VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

КЛАССИКИ НАУКИ

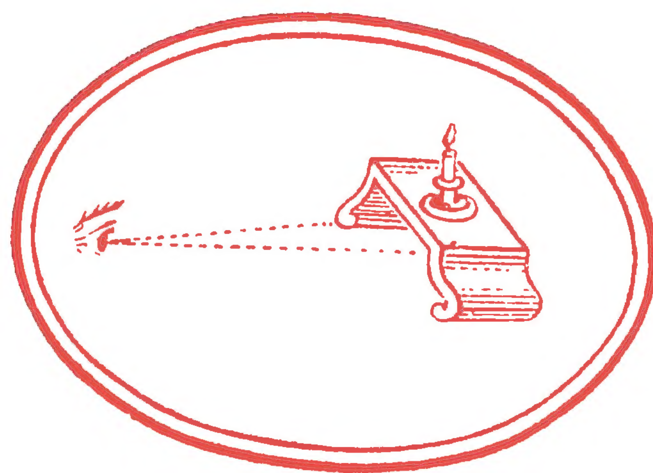


ПЬЕР БУГЕР

ОПТИЧЕСКИЙ ТРАКТАТ О ГРАДАЦИИ СВЕТА

ПЕРЕВОД
Н. А. ТОЛСТОГО и П. П. ФЕОФИЛОВА

РЕДАКЦИЯ, СТАТЬИ И КОММЕНТАРИИ
ПРОФЕССОРА
А. А. ГЕРШУНА



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
1950

Под общей редакцией Комиссии Академии Наук СССР
по изданию научно-популярной литературы
и серии „Итоги и проблемы современной науки“
Председатель Комиссии президент Академии Наук СССР
академик *С. И. ВАВИЛОВ*
Зам. председателя член-корреспондент Академии Наук СССР
П. Ф. ЮДИН


О ГРАДАЦИИ СВЕТА
ПЬЕР БУГЕР

ОПТИЧЕСКИЙ ТРАКТАТ О ГРАДАЦИИ СВЕТА



ПРЕДУВЕДОМЛЕНИЕ ИЗДАТЕЛЯ

Первый набросок этого сочинения появился в 1729 г. под названием „Опыт о градации света" в виде тома, изданного в одну двенадцатую. Он был встречен геометрами и физиками с единодушным одобрением и утвердил за его автором репутацию, которую тот уже заслужил несколькими превосходными отдельными трудами и сумел столь хорошо поддержать в дальнейшем.

Г-н Бугер заставил почувствовать, насколько важно продвинуть далее начатые им исследования о свете. Однако, вынужденный по роду службы пребывать в маленьком городке Бретани, он не был в состоянии обзавестись почти ни одним из приспособлений, необходимых для достижения успеха в тонких опытах. Известно, насколько опыты, которые можно предпринять по этому поводу, требуют, помимо всего прочего, совершенства и точности употребляемых инструментов. Он не был, таким образом, в состоянии усовершенствовать наиболее существенную для него физическую часть своего „Опыта", что он принимал чрезвычайно близко к сердцу.

Академия Наук не замедлила открыть двери человеку, столь способному приумножить ее славу, и г-н Бугер переехал из Круазика в Гавр-де-Грас. Однако, несмотря на приближение к столице, он все же не смог приняться вновь за излюбленное им сочинение. Затем долгое и тягостное путешествие в Перу, которое его заставили предпринять, составле-

ние отчета о нем, порученное ему Академией по его возвращении, возложенные на него министром обязанности непрерывной работы по всем вопросам морского дела — все это занимало его в течение более двадцати лет. Наконец, свободный от обязанностей, заставлявших его тратить с такою пользою время, которым он не считал возможным распоряжаться по своему усмотрению, он поспешил возродить свои старые идеи о градации света и посвятил два последние года своей жизни подготовке нового сочинения о том же предмете, достойного уже не носить более названия „Опыта".

Покончив со всеми экспериментами и всеми необходимыми расчетами, г-н Бугер занялся их описанием, когда был застигнут внезапным недугом, длившимся несколько месяцев, но не отвратившим его от продолжения своей работы. Прикованный к постели жестокою водянкою, он все же занимался ежедневно в течение многих часов своею книгою; он имел удовольствие увидеть последние страницы ее переписанными набело за несколько дней до смерти.*

Академия Наук, скорбя о преждевременной утрате столь достойного своего члена, взяла на себя заботу о его труде. Многие отрывки последнего были читаны им на собраниях этого Общества; он оказал мне честь, завещав заботу об издании этого труда.

Смерть не оставила ему времени снабдить его предисловием, которое он один был в состоянии написать должным образом. Не будучи в силах заменить его так, как мне того хотелось бы, я удовольствуюсь здесь кратким изложением того, что необходимо знать читателю.

В предисловии к своему „Опыту" г-н Бугер показал, что среди различных отделов Оптики существует один, который был в то время едва затронут. Этот отдел трактует о силе, или о яркости света. Необходимость восполнения этого пробела ощущалась и отмечалась во многих случаях. Г-н Бугер

* Г-н Бугер скончался 15 августа 1758 г.

был побужден к работе над этим предметом чтением мемуара г-на де-Мерана, опубликованного в томе Академии за 1721 г., в котором предполагалось известным отношение двух светов солнца в каждом из солнцестояний. Г-н Бугер попытался определить это отношение из опыта, и его размышления привели его к достаточно полной теории этого отдела оптики. Они подсказали ему новые способы проведения большого числа иных изысканий, касающихся этого предмета; они послужили, наконец, основою для его „Опыта о градации света". Г-н Бугер не скрывал того, что его определения страдали, может быть, недостаточною точностью, несмотря на все приложенные старания и участие свидетелей. Дабы избавиться от сомнений, г-н Бугер проделал впоследствии все новые опыты, которые можно найти в публикуемом ныне труде. Подобного же рода опасения в том, что не все еще результаты обладают должною точностью, явились причиною его отказа от окончательного суждения о некоторых из них. Во втором разделе первой книги можно заметить небольшие пробелы, кои я не смог восполнить. Мне известно от самого г-на Бугера, что они были оставлены им в копии его сочинения, ибо он не был вполне удовлетворен некоторыми из чисел, найденными им в его новых опытах. Он тешил себя надеждою воспроизвести их летом 1759 г. Я хотел бы, тем не менее, иметь возможность привести здесь эти, хотя и несколько ненадежные, цифры, однако в моем распоряжении была лишь та копия, о которой я только что говорил. Я сделал все, что мог, дабы собрать листы подлинника, с которого она была снята; мне удалось найти лишь несколько обрывков, не содержавших искомого: бумаги и приборы г-на Бугера были проданы или растеряны во время каникул Академии, в мое отсутствие. Я не счел нужным упразднить в связи с этим главы, содержащие эти пробелы, ибо ход опытов остался описанным, благодаря чему физики смогут воспроизвести их и заполнить недостающие места. Читатель извинит их присутствие в посмертном издании, в которое я не позволил себе внести какие-либо изменения.

Хотя рукопись, которою я пользовался, отнюдь не была лишена ошибок в алгебраических выражениях, будучи писана не рукою г-на Бугера, я надеюсь, что точность этого издания не вызовет нареканий. Я просмотрел все со вниманием и проверил все вычисления. К этому меня обязала дружба, которою меня почтил автор, и доверие, выказанное им мне, в частности, в связи с этим сочинением.

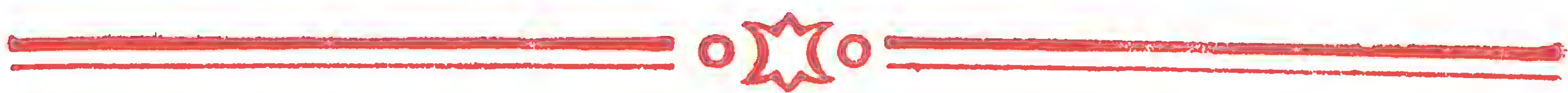
Н. Л. Де-ла-Кайль.

КНИГА ПЕРВАЯ



РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТА И НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ЭТИХ СПОСОБОВ[1–5]





Если расположить несколько свечей примерно на одной линии и получить на достаточно протяженной и достаточно удаленной поверхности тень от непрозрачного тела, помещенного между свечами и поверхностью, то можно увидеть заметную разницу между светом, даваемым одной или двумя свечами, и тем, который производят все прочие.[6]

Можно различать без труда 30 или 40 различных ступеней света: первая ступень находится непосредственно на границе тени, вторая образуется лучами двух первых свечей, и наряду с четвертой или пятой можно отчетливо видеть 10-ю, 20-ю или 30-ю и все промежуточные ступени. Таким образом, получается нечто вроде шкалы, дающей до известного предела почти все меры сравнения, которые могут понадобиться, когда желают измерить свет. Различие между 30-й и 31-й ступенями и даже между 39-й и 40-й воспринимается очень отчетливо. Стало быть, точность определений можно довести до этого предела, и, как будет видно из дальнейшего, можно даже попытаться превзойти этот предел.[7]

———



РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

СПОСОБЫ НАХОДИТЬ СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ СИЛАМИ ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ СВЕТОВ

ГЛАВА I

Использование свечей или ламп для измерения света

Столь естественный способ сравнения, доставляемый нам совокупным свечением многих свечей или ламп, может рассматриваться как первейший из всех способов измерения света. Правда, нам не удается узнать абсолютную силу света, мы находим ее всегда лишь относительным образом. Но не есть ли это совершенно то же самое, с чем мы сталкиваемся в точных науках, где мы сравниваем между собой величины, способные увеличиваться или уменьшаться? Не так же ли мало знаем мы, какова величина туаза или фута, однако мы не даем себе труда углублять знание природы протяженности, занимаясь практической геометрией. Мы судим здесь о свете лишь постольку, поскольку он испускается светящим телом или поскольку он падает на окружающие нас предметы. Воздействуя с большею или меньшею силою на наши глаза, он производит на нас большее или меньшее впечатление; однако мы оставим в стороне все, что касается метафизики ощущений, и, довольствуясь выявлением соотношений, существующих между этими внешними и случайными причинами, мы думаем лишь о том, как измерять эти соотношения.

Читатели разумеют, что если пользоваться в качестве общей меры сравнения светом нескольких свечей, то надлежит быть крайне внимательным, чтобы выбрать их все одинаковой толщины; кроме того, следует поместить их на одинаковом расстоянии от освещаемой поверхности и позаботиться о том, чтобы их лучи падали на поверхность под одинаковым наклоном. Однако соблюсти эти два последние условия иногда очень затруднительно или даже невозможно, не говоря уже о том, что не всегда в распоряжении имеется несколько совершенно одинаковых свечей или ламп, каждая из них неизбежно занимает некоторое место, и если поместить некоторое их число друг около друга, то они никогда не будут освещать вполне одинаково находящуюся перед ними поверхность. Быть может, следует также считать неудобством то, что они всегда дают свет, степени которого возрастают скачками, а именно на целую единицу при каждом увеличении их числа.

Мы избегнем, однако, всех трудностей, воспользовавшись не несколькими свечами, а ослаблением или усилением света от одной свечи, посредством увеличения или уменьшения расстояния от источника света; при этом мы будем получать бесконечное множество различных ступеней, которые будут столь малы, сколь это будет нам угодно. Свойство лучей распространяться по прямым линиям является причиной того, что они расходятся в той же мере, в какой они удаляются от светящего тела. Если лучи будут приходить с расстояния в десять раз большего, то они будут занимать пространство в десять раз большее как по ширине, так и по высоте. Следовательно, то же самое количество света будет распределено по пространству в 100 раз большему, и каждая точка будет освещена в 100 раз менее, или, что сводится к тому же, свет будет в 100 раз слабее.[8]

Выражаясь более общим образом, можно сказать, что лучи всегда образуют пирамиду, вершина которой есть светящее тело и основанием которой служит поверхность, на которую падает свет. Чем дальше удалиться от светильника, тем по

большей поверхности распространяются те же лучи. Эта преграда, или поверхность, возрастает точно в той же мере, что и квадрат расстояния до светящего тела, а так как она получает в то же время на всей своей протяженности то же самое число лучей, то очевидно, что лучей в каждой точке будет соответственно меньше и что сила, или интенсивность света будет во столько же раз меньшей, во сколько раз бо́льшим будет квадрат расстояния до светильника.

Использование зажигательных стекол и зеркал для измерения света. То, что мы здесь говорим, применимо равным образом к фокусам выпуклых или вогнутых стекол и зеркал. После того, как лучи пересеклись в фокусах или приняли такое направление, как если бы они выходили из этих фокусов, они распространяются, удаляясь друг от друга, и заполняют непрерывно возрастающую площадь, пропорциональную квадрату расстояния до точки пересечения лучей, заменяющей, таким образом, светящее тело. Следовательно, зажигательные стекла и зеркала дают нам еще один простой способ изменять свет в желаемом отношении. Для того чтобы узнать это отношение, достаточно измерить точно расстояние до фокуса, или, что сводится к тому же, измерить основания пирамид, образуемых расходящимися лучами, взять диаметры этих оснований и возвести их в квадрат; обратные значения полученных чисел будут выражать силы света.[9]

Не следует, впрочем, пользоваться ни слишком большими расстояниями, ни слишком малыми. Если расстояния слишком велики, свет уменьшается не только из-за расхождения лучей, но также и вследствие встречи с частицами воздуха, которые могут, если расстояние велико, задержать значительную долю лучей. Правда, для того, чтобы эта помеха стала ощутимой, потребовалось бы относить предметы на значительные расстояния, по крайней мере в достаточно ясную погоду, ибо толща воздуха в 200 туаз поглощает или задерживает, как будет видно из дальнейшего, едва ли более сотой части света, который через нее проходит.[10]

С другой стороны, надлежит быть крайне внимательным к тому, чтобы не пользоваться слишком малыми расстояниями, и иметь возможность рассматривать светящее тело как точку или пренебречь, без заметной ошибки, протяженностью, всегда присущей фокусу зеркала или зажигательного стекла. Наши обычные настольные свечи имеют пламя, диаметр которого чаще всего составляет полдюйма, а высота полтора или два дюйма, и если, имея в виду сделать свет от них более сильным, удаляться от них всего лишь на один или два дюйма, то имеется опасность ошибиться в выборе места пламени, от которого надлежит измерять расстояние. Дело будет обстоять иначе, если удалиться на один или два фута или более. Можно также, воспользовавшись стеклянной чечевицей, имеющей очень короткий фокус, например один или два дюйма, поместить ее на расстоянии по крайней мере в 10 или 12 дюймов. Однако, поскольку мы уже имеем различные способы увеличивать или уменьшать силу света, мы будем пользоваться одними вместо других или сочетать их, если какой-либо один из них окажется недостаточным.

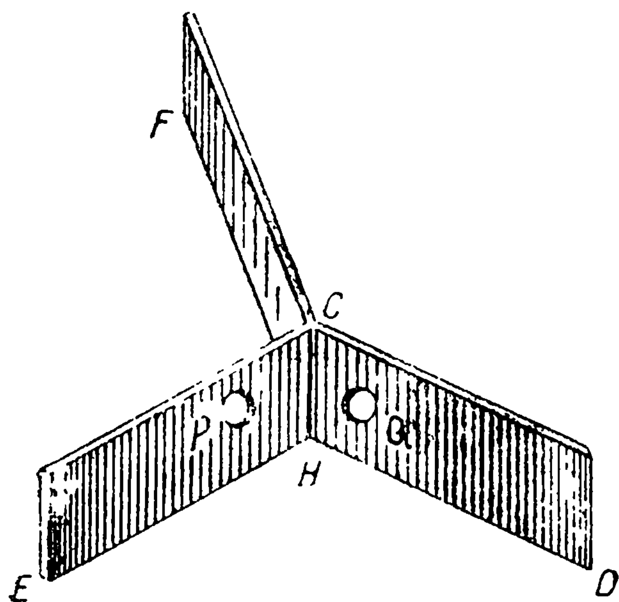
ГЛАВА II

Подробное описание предосторожностей, которые надлежит соблюдать при сравнении двух светов

Мы сделаем более ощутимой значительную часть только что указанных вещей, отметив много подробнее меры предосторожности, которые надлежит принимать при суждении о том, насколько более света испускает светильник определенного размера по сравнению с отдельной свечой. Заставим сначала лучи от этих двух светящих тел падать под одинаковым углом на два различных участка поверхности, которую мы будем удалять на большее или меньшее расстояние от светильника или от свечи до тех пор, пока эти два участка поверхности не станут казаться нам совершенно одинаково освещенными. Тогда остается лишь измерить оба расстояния, и

их квадраты будут выражать отношение абсолютных сил света двух светящих тел.

Если, например, свечу надлежит придвинуть в три раза ближе, то это будет указывать на то, что она испускает в девять раз менее света, чем светильник, так как для того чтобы сделать оба света совершенно одинаковыми, необходимо увеличить в девять раз свет от свечи, уменьшив расстояние в три раза. Одно из расстояний, быть может, окажется не точно в три раза менее другого, — например, оно будет равно 6 футам, тогда как другое будет составлять 15. Квадраты этих чисел, 225 и 36, покажут нам тогда, что светильник освещает сильнее, чем свеча в отношении 225 к 36, или что его свет сильнее в $6\frac{1}{4}$ раз.



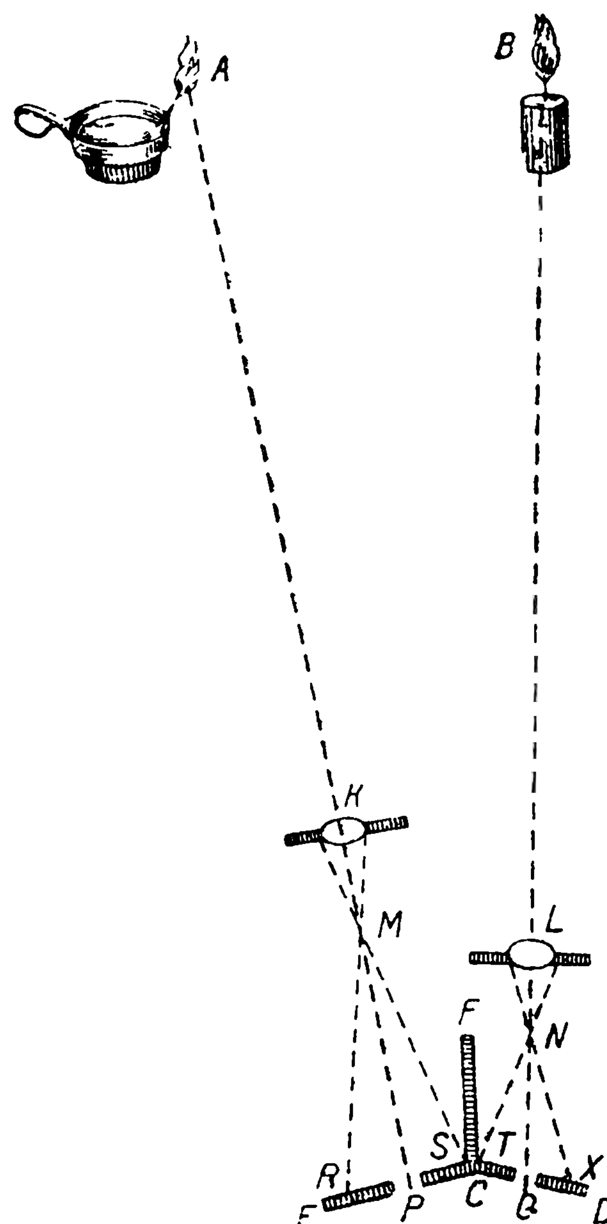
Фиг. 1.

Для сравнения двух светов можно воспользоваться простым куском картона *ECD* (фиг. 1), согнутым в *CH*, что позволяет установить каждую половину поверхности перпендикулярно к каждому из светов. Весь кусок картона следует зачернить, проделав в нем, однако, два отверстия, в точности одинаковой величины, например 3 или 4 линии в диаметре;[5] на эти отверстия накладывают бумагу, пропитанную маслом, или два совершенно одинаковых куска стекла, сделанных одинаково матовыми или белыми с помощью наждака или песчаника. Промасленная бумага и матовое стекло оказываются иногда более прозрачными, чем следует, и я чаще пользовался двумя кусками очень тонкой и очень белой бумаги, которые я вырезал из одного и того же листа. Я заставлял два света падать на эти два куска бумаги и судил о равенстве их силы, рассматривая бумагу сзади или иногда спереди. Второй кусок картона служил перегородкой и препятствовал смешению обоих светов перед их падением на малые поверхности *P* и *Q*. Эта

перегородка была черной с обеих сторон и прикреплялась к первому картону как раз в том месте, где последний был согнут.

Этот же прибор обозначен буквами *ECD* на фиг. 2.

Если мы не можем изменять расстояния двух светящих тел от этого прибора в той мере, в какой это необходимо для того, чтобы сделать их света одинаковыми, то для достижения равенства не остается ничего иного, как воспользоваться стеклянными чечевицами или менисками. Существенно, чтобы эти стекла были совершенно одинаковыми, дабы не опасаться недостатка прозрачности у одного из них более, чем у другого. Пусть светильник *A* и свеча *B* (фиг. 2) помещены на одинаковом расстоянии от наблюдателя или от прибора *ECD*; первое из этих светящих тел должно посылать много более света, чем второе.[11] Однако, удаляя стеклянную чечевицу *K* от наблюдателя, можно, если только не уносить ее за середину расстояния до светильника, уменьшить свет в очень сильной степени; при этом легко добиться, чтобы свет в *P* имел такую же силу, что и свет от свечи *B*, который, проходя через стеклянную чечевицу *L*, падает на отверстие *Q*. Оба света образуют конусы *RMS* и *TNX*, однако мы судим об их силе, наблюдая лишь отдельные светящие точки *P* и *Q* или отдельные части *P* и *Q*, покрытые белой бумагой, и мы должны всегда очень внимательно следить за тем, чтобы эти точки находились точно на оси световых конусов и чтобы они составляли лишь очень малую часть оснований *RS* и *TX*.



Фиг. 2.

Каждый свет претерпевает при этом два различных изменения. Доходя до выпуклых стекол K и L, он ослабляется в большей или меньшей степени, сообразно обратному отношению квадратов расстояний AK и BL. Если предположить, что BL равняется 10 футам, а AK лишь 9, то свет свечи будет ослаблен более, чем свет светильника, и эти два ослабления будут относиться, как 100 к 81.[12] Однако затем каждый свет ослабляется еще раз, причем это второе ослабление может оказаться более сильным, чем первое. Лучи светильника, после пересечения или соединения в фокусе M стеклянной чечевицы K, расходятся и распределяются по всему пространству RS, в то время как лучи свечи получают ослабление в меньшей степени, распространяясь лишь по пространству TX.

Отношение, в котором находятся эти два последние ослабления, можно найти, взяв квадраты расстояний MP и NQ; однако, если хотят избавиться от различных докучных обстоятельств, не пренебрегая в то же время ничем существенным, следует, как мы уже видели, взять вместо этих расстояний сами диаметры RS и TX освещенных участков. Хотя края этих участков приходятся на непрозрачные и черные части прибора, они всегда достаточно отчетливы, чтобы можно было легко измерить эти диаметры RS и TX, после того, как обе светящиеся точки P и Q сделаны равнояркими. Если первый диаметр равен 40 линиям, я умножаю его квадрат, 1600, на квадрат AK, равный 81, и получаю 129 600. Я проделываю то же самое для второго света. Я умножаю квадрат BL, равный 100, на квадрат диаметра TX светового конуса, вершиной которого является N, и если этот диаметр равен 16 линиям, я получаю произведение, равное 25 600.

Уместно заметить, что поскольку речь идет здесь только об отношениях, не обязательно пользоваться для выражения всех этих расстояний одними и теми же мерами. Измерив AK в футах, необходимо пользоваться этой же мерой и для выражения BL. Затем мы выражаем в линиях диаметр RS светового конуса, вершиной которого является M, и пользуемся

также линиями при измерении другого конуса. Эти действия дают 129 600 и 25 600 для изменений, которым следует подвергнуть два света для того, чтобы сделать их совершенно одинаковыми: первый следует ослабить в $20\frac{1}{16}$ раз сильнее, чем второй. Это означает, следовательно, при высказанном предположении, что первый свет, если выражать его силу в абсолютной мере, в $20\frac{1}{16}$ раза сильнее второго.[13]

Если передвигать выпуклые стекла K и L к середине расстояния от светящего тела до прибора ECD, то получаемый ими свет усиливается; однако эти же самые стекла рассеивают его затем в большей степени, заставляя его падать на большее расстояние от их частных фокусов M и N; в результате сочетания этих двух изменений получается более значительное ослабление. Наибольшее ослабление получается вовсе не в точке, лежащей по середине, а в точке, отличающейся от нее на величину KM или LN, несколько увеличивающуюся по мере приближения выпуклого стекла к светящему телу, как это известно читателям, сведущим в оптике.

Вообще, первое ослабление двух светов происходит в отношении AK^2 и BL^2, а второе в отношении MP^2 и NQ^2 или в отношении квадратов диаметров RS и TX двух световых конусов. Таким образом, двойные изменения следуют отношению $AK^2 \times RS^2$ и $BL^2 \times TX^2$, и так как посредством их можно сделать одинаково сильными оба света, получаемые в P и Q, то с необходимостью следует, что первое светящее тело освещает сильнее, чем второе в том же отношении, или что светильник A посылает больше света, чем свеча B в отношении $AK^2 \times RS^2$ к $BL^2 \times TX^2$.[14]

Не составит труда приложить этот метод к практике: обычно для того, чтобы сделать его точным, достаточно принять некоторые меры предосторожности, которыми, впрочем, не следует пренебрегать и во всех остальных случаях. Надлежит устранить со всей возможной тщательностью весь посторонний свет, и наблюдение будет еще более удачным, если сделать

помещение совершенно темным, обив его черной материей. Кусок картона CF составляет существенную часть прибора ECD, но я обычно помещал в F второй кусок, который мешал обоим светам падать наклонно на обе поверхности первого. Эти куски картона или перегородки надлежит всегда устанавливать таким образом, чтобы они находились в тени друг друга, дабы избежать лучше всяких отблесков. Обе стеклянные чечевицы K и L должны быть в то же время обрамлены двумя большими поверхностями или кусками черного картона, что также увеличивает затемненность.

Наконец я заметил, что не менее важно обратить внимание и на следующее, о чем я уже упоминал, а именно: участкам P и Q, служащим предметом наблюдения, надлежит придать в точности одинаковую форму и размеры, чтобы для наблюдателя, рассматривающего их, все казалось бы совершенно одинаковым. Эти два освещенные участка должны быть расположены как можно более близко друг к другу. Совершенно необходимо, чтобы их можно было видеть сразу, а еще лучше сделать так, чтобы их края соприкасались. Я почти всегда рассматривал их через отверстие, сделанное в последней перегородке, которую я устанавливал на некотором расстоянии от глаза, и которая скрывала от меня все прочие предметы.

Наблюдение будет несколько более затруднительным и в то же время менее точным, потому что оно будет менее непосредственным в тех случаях, когда предпринимают сравнение двух источников света, которые не светят одновременно или которые слишком трудно приблизить друг к другу. В этом случае надлежит воспользоваться в качестве общей меры третьим источником света и сравнивать его последовательно с двумя другими. Этим вспомогательным источником света может служить свеча или лампа, однако необходимо, чтобы этот источник был одним и тем же при обоих сравнениях, причем всегда следует повторять опыт несколько раз и брать среднее из получаемых результатов. Для того чтобы избежать случайных изменений, которые может испытывать с течением

времени светящее тело, можно поступить еще лучше: вместо того, чтобы пользоваться в качестве общей меры лишь одной свечой или лампой, можно воспользоваться несколькими, например четырьмя или пятью, источниками, которые будут светить одновременно и совокупный свет которых будет более неизменным. Как бы то ни было, в тех случаях, когда это возможно, не следует жалеть труда, чтобы сделать наблюдение более непосредственным, для чего могут послужить другие способы, которые мы собираемся предложить.

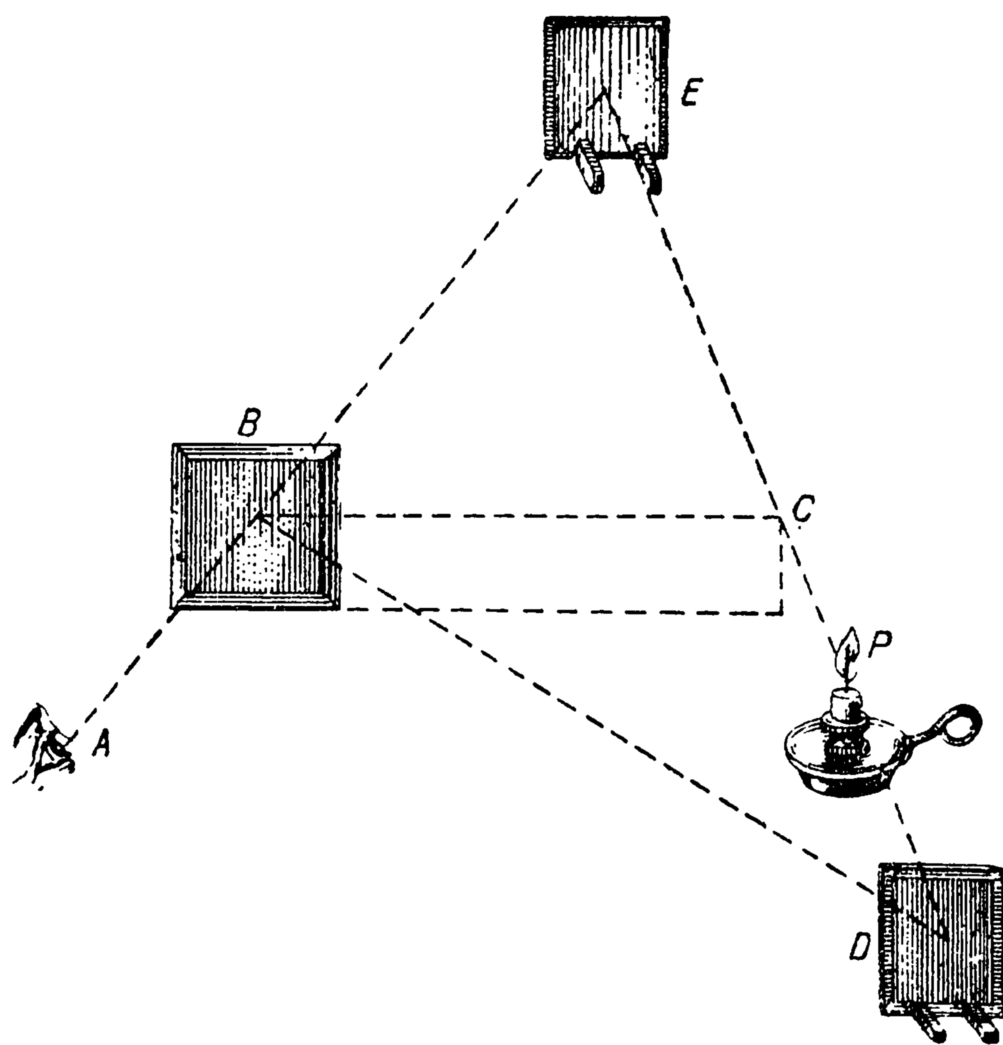
ГЛАВА III

Способ получить от одного светильника или от одной свечи пучки света, которые надлежит сравнивать в различных опытах

В изысканиях, коими мы занимаемся, часто бывает необходимо определить, какое количество света отражает тело, поверхность которого полирована, например зеркало, сравнительно со светом, который на него падает, или отметить, какова точная степень пропускания прозрачного тела определенной протяженности. Можно было бы попытаться выбрать для решения этих задач две свечи точно одинаковой толщины или две совершенно одинаковые лампы. Следовало бы заставить свет одной из них отражаться или проходить сквозь прозрачные тела и сравнивать его затем со светом другой свечи; однако очень легко придать опыту форму, сулящую ему гораздо больший успех.

Положим для начала, что речь идет об отражении; поместив вертикально в B (фиг. 3) зеркало или отражающую поверхность, мысленно продолжают их плоскость до C и, взяв две дощечки совершенно одинакового цвета, или, иначе говоря, одинаковой белизны, помещают их перед зеркалом и позади его на равных расстояниях, располагают эти дощечки в точности параллельно друг другу или придают им одинаковый наклон относительно соединяющей их линии ED; они будут

освещены лампой или свечой P, помещенной на той же прямой линии ED. Затем ищут точку A, из которой дощечка D видна вследствие отражения в зеркале и притом таким образом, чтобы другая дощечка E, помещенная немного выше своего настоящего места или немного сбоку от него, была видна одновременно; следует, чтобы обе дощечки, видимые одна вследствие отражения, а другая непосредственно, казались бы образующими единую поверхность или соприкасающимися; кроме того, необходимо сделать их кажущуюся белизну или оттенки их света совершенно одинаковыми, передвигая свечу P вдоль прямой ED в том или другом направлении; после этого остается лишь измерить расстояния EP и DP, и квадраты этих расстояний укажут отношение, в котором отражение от зеркала уменьшает силу света.[15]

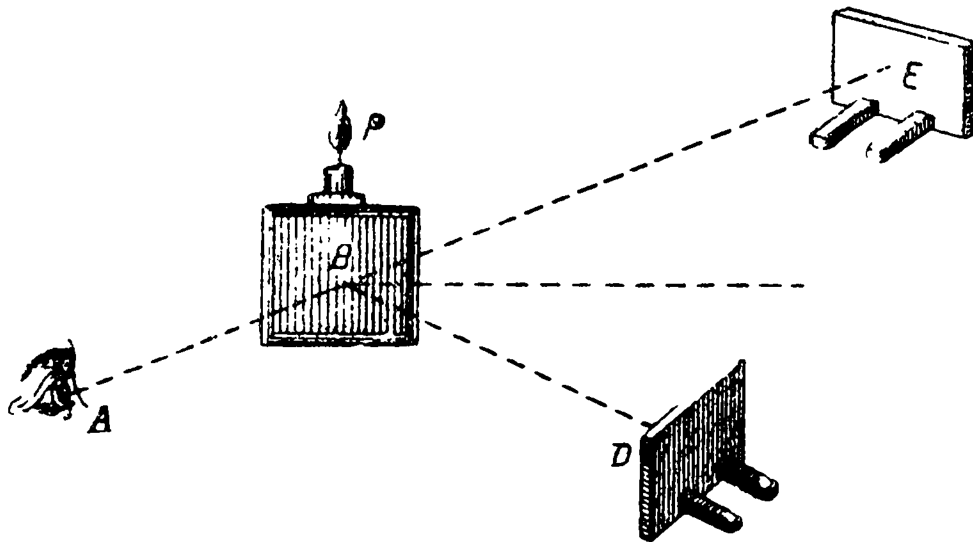


Фиг. 3.

Очевидно, что если бы зеркало отражало без всякого изменения все лучи, которые оно получает, то для того, чтобы дощечки казались освещенными одинаково, свечу P надлежало бы поместить в точности посередине промежутка между дощечками, в точке C, поскольку все прочие условия для них одни и те же. Но так как отражение приводит всегда к большой потере силы света, то эту потерю можно возместить, лишь значительно приблизив свечу P к дощечке D, видимой вследствие отражения. Эта дощечка будет, следовательно,

освещена сильнее, нежели другая, в том же отношении, в каком квадрат PE больше квадрата PD; это же отношение должно, таким образом, выражать ослабление света при отражении от зеркала, поскольку большая близость свечи к дощечке D служит тому, чтобы восстановить равенство тона двух светов, нарушенное при отражении.

Излишне было бы напоминать о том, как важно, чтобы глаз находился всегда в тени; однако мы не преминем упомянуть о том, что и зеркало должно быть затенено и не должно освещаться никаким иным светом, кроме того, который приходит к нему от дощечки D; в противном случае свет, падающий на его поверхность, присоединяется отчасти к свету от дощечки. Повторяя опыт, не худо поменять дощечки местами, дабы устранить опасение относительно неравенства их цветов, между которыми может существовать некоторое различие. Наконец, если желательно делать наблюдения с лучами света, образующими слишком малые углы с поверхностью зеркала, то опыт приходится вести совершенно иначе, ибо в этом случае следовало бы располагать обе дощечки D и E слишком близко друг от друга и, не говоря уже о том, что между ними было бы трудно поместить свечу, измерение обоих расстояний повлекло бы за собой слишком большие погрешности.



Фиг. 4.

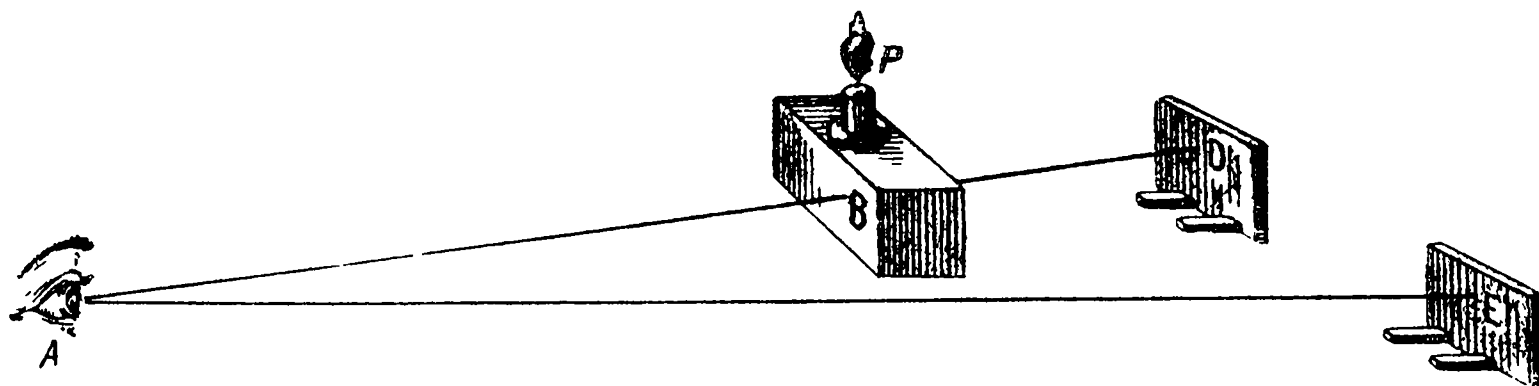
Другое расположение свечи, когда желают, чтобы свет падал очень косо. В этом случае лучше поместить свечу очень близко к зеркалу: ее можно поставить над ним или несколько сбоку, добившись с помощью различных перегородок, чтобы она не освещала зеркала и ничуть не мешала глазу. Она будет освещать обе дощечки D и E

почти перпендикулярно (фиг. 4): дощечку *D*, видимую благодаря отражению в зеркале, и дощечку *E*, видимую в то же самое время непосредственно. Однако, поскольку яркость цвета первой дощечки будет ослаблена вследствие отражения, надлежит отнести дощечку *E* на заметно большее расстояние, дабы сделать оба цвета или света в точности одинаковыми. После того, как мы добились этого, нам остается измерить оба расстояния *PE* и *PD* между свечой и каждой из дощечек и получить тем самым через квадраты этих расстояний искомое соотношение.

Если бы пришлось сделать расстояние *PE* равным 60 дюймам, когда *PD* равно 50, то дощечка *D* была бы освещена сильнее другой в отношении 3600 к 2500 и избыток света, получаемый при этом дощечкой *D*, служил бы лишь к восполнению его потери, вызванной отражением. Поскольку дощечка *E* удалена от наблюдателя на заметно большее расстояние, чем другая дощечка, она будет казаться ему меньшего размера, а потому ее следует сделать большей или уменьшить величину другой дощечки с помощью диафрагм так, чтобы обе они казались совершенно одинаковыми, сообразно с тем, что мы советовали выше.

В этом и заключается та единственная предосторожность, которую следует соблюдать в том случае, когда дощечка *E* удалена на большее расстояние, ибо отнюдь не следует бояться того, что яркость света покажется меньшей, будучи наблюдаема с большего расстояния. Если наблюдатель удален, например, на расстояние в три раза большее, то он получит от каждой точки предмета в девять раз меньше лучей; но, с другой стороны, поскольку изображение предмета будет меньше и точки этого изображения будут приближены одна к другой как раз в том же отношении, яркость изображения, или интенсивность его цвета или его света будет всегда одной и той же. Две параллельные стены, удаленные на разные расстояния, кажутся нам по этой же причине одинаково освещенными солнцем или одинаково белыми, если оба эти расстояния

не настолько велики, чтобы воздух мог придать некоторый легкий оттенок своего цвета одной из этих стен. Если встать на расстоянии в десять раз большем от одной стены, нежели от другой, то от каждой точки более удаленной поверхности до нас дойдет в сто раз менее света, но тот же участок сетчатки будет отвечать в сто раз большему числу этих самых точек, и вследствие этого действие света на равные участки дна нашего глаза будет всегда одним и тем же.[16] Поэтому в наших опытах достаточно измерить с тщательностью оба



Фиг. 5.

расстояния *PD* и *PE*, единственно влияющие на яркость обеих дощечек, и отнюдь не нужно считаться с их удаленностью от наблюдателя.

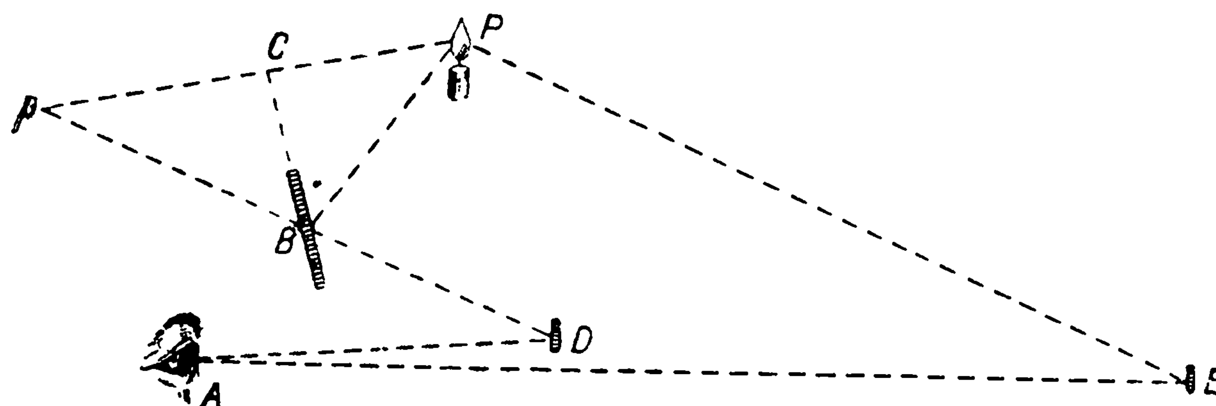
Определить, насколько ослабляется свет, проходя через прозрачное тело. Почти тем же способом можно определить ослабление, претерпеваемое светом, проходящим через прозрачное тело. На фиг. 5 мы обозначили через *B* прозрачное тело, имеющее форму прямоугольного параллелепипеда, и поместили сверху свечу *P*, одновременно освещающую почти перпендикулярно обе дощечки *D* и *E*. Эти дощечки рассматривают одним взглядом: первую через прозрачное тело, а вторую непосредственно. Эта последняя покажется освещенной ярче, нежели вторая, если только ее не отнести на большее расстояние от свечи. Несколькими небольшими перемещениями добиваются того, чтобы оба цвета казались одинаково яркими или чтобы оба предмета казались имеющими одинаковую степень белизны, после чего определяют квадраты обоих расстояний до свечи; если одно расстоя-

ние в два или три раза больше другого, то дощечка D будет освещена в четыре или в девять раз сильнее, чем другая; это покажет, что прозрачное тело ослабляет в четыре или в девять раз свет, который через него проходит.

ГЛАВА IV

Второй способ получить от одного светильника или от одной свечи пучки света, которые надлежит сравнивать

Вышеописанные опыты удаются также и в том случае, если пользоваться заметно отличающимся расположением. Пусть нужно определить, насколько плоское зеркало B (фиг. 6)

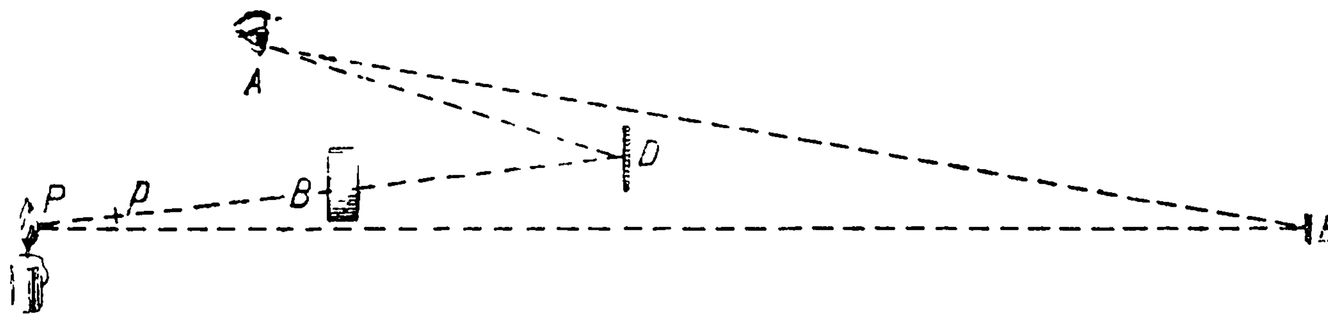


Фиг. 6.

ослабляет свет, который падает на него под углом PBC; для этого заставляют падать этот свет на дощечку D и добиваются того, чтобы дощечка E, помещенная на большем или меньшем удалении, была непосредственно освещена светом той же силы. Все читатели, сведущие в основных принципах катоптрики, не замедлят понять, что лучи, падающие на первую дощечку, будут направлены после отражения так, как если бы они исходили из точки p, расположенной столь же сбоку и позади зеркала, сколь свеча перед ним. Если бы при отражении свет нимало не ослабевал, то, удаляя одну из дощечек на большее или меньшее расстояние до тех пор, пока обе дощечки не станут освещенными одинаково, мы

обнаружили бы совершенное равенство расстояния pD или суммы $PB + BD$ падающего и отраженного лучей и расстояния PE. В действительности же дощечку E приходится всегда отодвигать несколько далее, ввиду несовершенства зеркала, которое поглощает некоторое количество лучей. Для того чтобы узнать отношение, в котором свет ослабляется при отражении, остается лишь взять квадраты расстояний pD и PE.

Производя этот опыт, следует соблюдать предосторожность, состоящую в том, что оба луча PE и BD надлежит сделать почти параллельными, дабы иметь возможность смотреть из некоторой, достаточно удаленной, точки A на обе

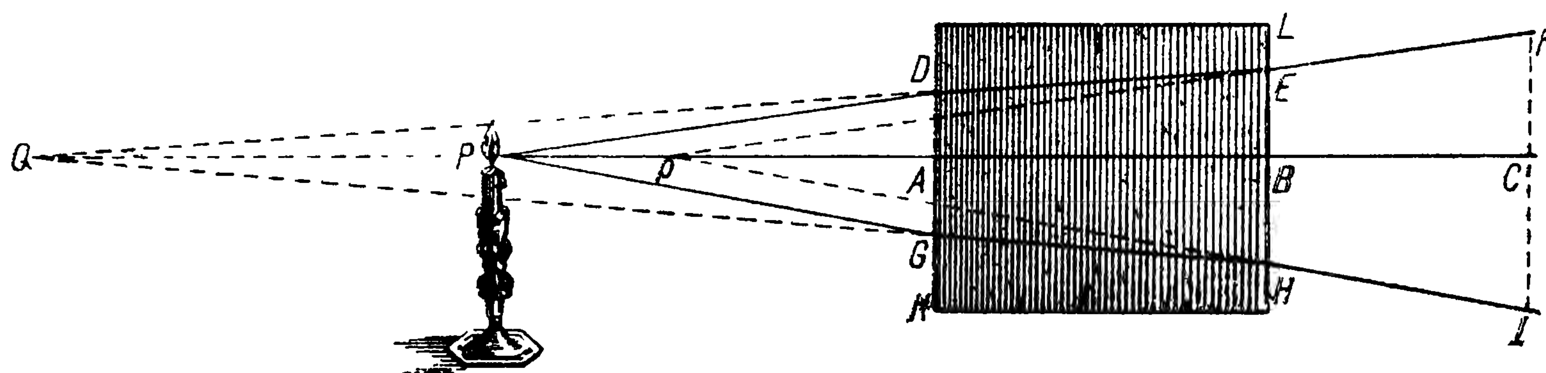


Фиг. 7.

дощечки в перпендикулярном к ним направлении или под одинаковым к ним углом и при этом чтобы сами дощечки освещались почти перпендикулярно или под одинаковыми углами. Что же касается большего или меньшего удаления наблюдателя от дощечек, то, как мы уже видели, оно не изменяет сил света.[17]

Не труднее определить точную степень пропускания света прозрачным телом, ограниченным двумя плоскопараллельными поверхностями. Пусть свет, испускаемый свечой, пройдя через такое тело, помещеннное в B, падает на дощечку D (фиг. 7); другую дощечку E, на которую лучи падают непосредственно, удаляют до тех пор, пока она не окажется столь же сильно освещенной. Следует, однако, принять в соображение, что лучи, проходящие через прозрачное тело, меняют свой путь; выходя, они имеют такое направление, как если бы они шли из точки p, являющейся как бы фокусом и удаленной от P

на расстояние, зависящее от толщины прозрачного тела и от его природы. Таким образом, сила света, проходящего через прозрачное тело, претерпевает всегда двойное изменение. Часть лучей уничтожается или перехватывается вследствие того, что тело не является совершенно прозрачным; это и есть то изменение, которое мы хотим обнаружить. С другой стороны, сила света увеличивается вследствие того, что лучи оказываются направленными так, как если бы светящее тело передвинулось в точку p. Из этого следует, что достаточно измерить оба расстояния PE и pD и возвести их в квадрат, чтобы получить то отношение, в котором ослабляется свет по причине несовершенной прозрачности тела B.



Фиг. 8.

Нам остается, однако, определить положение точки p или мнимого фокуса, из которого как бы исходит свет, прошедший через прозрачное тело. Для этого необходимо рассмотреть ход лучей на всем их пути, изображенном на фиг. 8. Луч $PABC$, проходящий перпендикулярно обеим параллельным сторонам тела KL, не претерпевает никакого преломления. Лучи PD и PG, входя в прозрачное тело, отклоняются, приближаясь к перпендикуляру поверхности, и приобретают те же направления DE и GH, какие они имели бы, если бы они исходили из точки Q, расположенной позади светящего тела таким образом, что для всех лучей, близких к перпендикуляру, имеет место постоянное отношение между QA и PA. Это отношение тождественно с тем, в котором находятся синусы углов падения и преломления, ибо эти углы отсчитываются от перпендикуляра к преломляющей поверхности;

в точнейшем смысле такое же соотношение существует между линиями QD и PD, которое можно считать не отличающимися по своей длине от линий QA и PA.

Однако, достигнув точек E и H, лучи претерпевают второе отклонение; они выходят, удаляясь от перпендикуляра, и следуют по направлениям EF и HI, которые в точности параллельны первоначальным направлениям PD и PG, будучи направлены так, как если бы они исходили из точки p. Следовательно, DE относится к Pp так же, как QD к QP. Однако вместо QD и QP мы можем взять синус угла падения и его избыток над синусом угла преломления, а также можем заменить DE на толщину AB. Таким образом, мы найдем Pp из следующей пропорции: синус падения относится к разности синуса падения и синуса преломления, как AB к Pp.[18] Мы вправе также воспользоваться вместо синусов числами, выражающими их постоянное отношение. Синусы падения и преломления относятся приблизительно как 3 к 2 в случае хрусталя и как 4 к 3 в случае воды. Следовательно, мы имеем такую пропорцию: 3 относится к 1, как AB к Pp в случае первого из этих прозрачных тел, и как 4 к 1 в случае второго. Другими словами, мнимый фокус p удален от светящего тела на треть толщины прозрачного тела, если последнее представляет собой хрусталь, и на четверть этой толщины, если последнее представляет собой воду.

Теперь, когда мы определили мнимый фокус или точку p, совершенно очевидно, что в опыте, изображенном на фиг. 7, мы должны принять его во внимание. Лучи, выходящие из светящего тела, падают на дощечку D, как если бы они исходили из точки p, или как будто светящее тело было перенесено в эту точку. Следовательно, при изменении света это обстоятельство надлежит иметь в виду. Нам остается, однако, показать, что мы избавлены от этого в опыте, изображенном на фиг. 5, о котором мы говорили в предыдущей главе.

Если сравнивать мысленно каждую точку дощечки D со светящим телом P на фиг. 8, то, помещая глаз в C, на той же

фиг. 8, мы будем, действительно, получать большее число лучей от каждой из этих точек. Они будут направлены так, как если бы они исходили из точки *p*. Следует, однако, иметь в виду, что вся дощечка в целом будет казаться в то же самое время как бы придвинутой ближе. Она находится в *P*, а кажется помещенной в *p*. Таким образом, она рассматривается под большим углом, и, если взять некоторое число ее точек, то они займут на дне глаза большее пространство, и интенсивность, или сила света[19] останутся в точности прежними. Каждая точка будет, так сказать, более светлой, но эти точки будут казаться более удаленными друг от друга в том же самом отношении. Итак, очевидно, что при рассматривании предмета сквозь прозрачное тело совершенно не следует принимать во внимание мнимый фокус на фиг. 5, однако ему следует уделить сугубое внимание в случае фиг. 7, где лучи, освещающие объект, производят такое же действие, как если бы они исходили из точки *p*; в этом случае никакой компенсации не происходит.

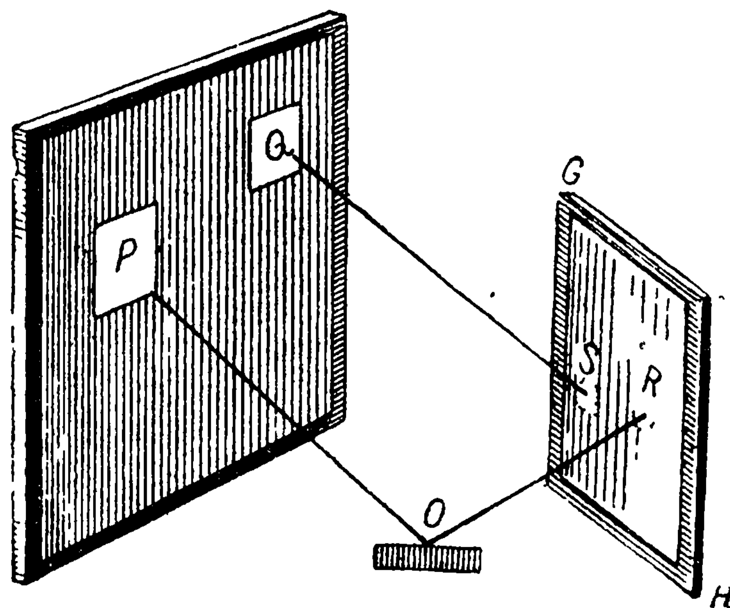
ГЛАВА V

Решение большинства предыдущих задач путем введения некоторой части дневного света в камеру-обскуру

Я пытался найти некоторые другие способы избежать при измерении света случайных неравномерностей тех вспомогательных источников света, коими приходится пользоваться. Я впускал лучи дневного света в камеру-обскуру через два разных отверстия, заставлял их отражаться или проходить через какое-нибудь прозрачное тело, и сравнивал их с прямым светом, поступавшим через второе отверстие, размер которого, так же как и размер первого отверстия, я тщательно определял. Я всегда выбирал для опыта ясный день и добивался того, чтобы оба отверстия были направлены на часть небосвода, расположенную приблизительно против солнца. Фиг. 9 изображает внутренность камеры-обскуры; отверстия обозначены

через P и Q.[20] Я мог несколько менять расположение отверстий, передвигая их выше или ниже, а также изменять их величину; я осуществлял все эти изменения с помощью кусков обыкновенного картона, которые я заставлял скользить один по другому; наибольшими отверстиями, которыми я пользовался, были квадраты со сторонами от 7 до 8 дюймов.

Для того чтобы испытать, насколько зеркало или поверхность жидкости ослабляют свет, отражая его, я располагал горизонтально в точке O зеркало или помещал туда сосуд, содержавший жидкость. Эта жидкость отбрасывала в точку R на экране GH свет, который она получала от отверстия P. Затем я увеличивал или уменьшал другое отверстие Q до тех пор, пока свет, проходивший через него и падавший на S, не казался мне столь же сильным, что и второй свет; тогда величины этих двух отверстий давали мне отношение, в котором ослаблялся свет, отразившись от зеркала или от поверхности жидкости, помещенной в O.



Фиг. 9.

Делая эти наблюдения, важно обратить внимание на то, чтобы оба луча PO и QS, длину которых я обычно выбирал равной 7 или 8 футам, были в точности параллельными, дабы оба света исходили из двух точек небосвода, одинаково возвышенных над горизонтом, и имели бы в точности одинаковую силу. Следовательно, если желают, чтобы оба изображения R и S находились на одной высоте и в непосредственной близости друг к другу, то второе отверстие Q надлежит поместить несколько выше первого отверстия P.[21] Не менее важно, чтобы экран GH был в этом случае расположен строго вертикально, дабы отраженный луч OR и прямой луч QS падали на него под строго одинаковыми углами;

в противном случае, хотя оба света и будут уравнены, они будут освещать экран неодинаково. Подобное расположение способствует выполнению еще одного важного условия. Прямой луч QS оказывается в точности той же длины, что и сумма двух лучей — падающего PO и отраженного OR, — а это необходимо для того, чтобы количества света, введенного в камеру, были как раз пропорциональны величинам обоих отверстий.

Что касается до экрана GH, то его, если угодно, можно изготовить из пергамента или белой бумаги, а изображения R и S можно ограничить диафрагмами; можно, напротив, воспользоваться куском черного картона, прорезав в нем два круглых отверстия диаметром в 3 или 4 линии и закрыв их двумя кусками белой бумаги. Само собой разумеется, что для того, чтобы отделить друг от друга почти на всем их протяжении оба пучка или пирамиды света, совершенно необходим занавес, простирающийся от экрана до обоих отверстий; ясно также, что не менее существенно расположить еще одну преграду над отражающей поверхностью O, дабы помешать изображению R быть освещенным иным светом, кроме отраженного. Мы советуем пользоваться черным экраном с двумя прорезанными отверстиями лишь по той причине, что, убирая куски бумаги, прикрывающие отверстия, можно прикладывать к последним глаз и проверять, не заслоняют ли диафрагмы или занавеса, которыми иногда приходится пользоваться, часть двух основных пучков света.

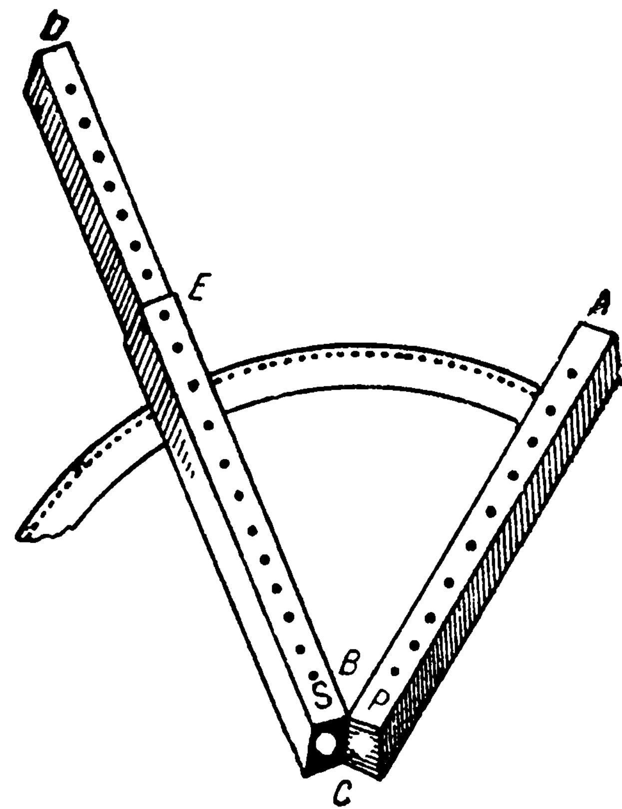
Когда хотят просто сравнить свойства двух поверхностей в отношении их отражательных способностей, то можно легко и быстро сделать большое число наблюдений, внеся незначительные изменения в только что описанное устройство. Необходимо лишь расположить горизонтально позади экрана друг около друга две поверхности, предназначенные для исследования, и рассматривать в них, как в зеркале, две светящие точки R и S, получающие больше или меньше света при изменении отношения двух отверстий, которые следует поместить

на одинаковой высоте. В этих новых опытах необходимость вертикального расположения экрана отпадает; лучше даже отклонить его назад с тем, чтобы он был освещен сильнее, а также, чтобы лучше видеть отраженные от обеих поверхностей светящие точки R и S, изображения которых должны казаться одинаково яркими; произведя сравнение для некоторого угла падения, повторяют его для другого угла, помещая выше или ниже те же светящие точки R и S.

ГЛАВА VI

Устройство прибора, предназначенного для измерения силы света и обладающего некоторыми свойствами камеры-обскуры

Почти все преимущества, которыми обладает камера-обскура, можно использовать, построив прибор или несложную машину, объединяющую в малом все основные свойства камеры-обскуры. Две трубы, зачерненные изнутри и снабженные сверх того рядом диафрагм, помещенных главным образом посередине их длины, соединены своими нижними концами посредством шарнира, находящегося в BC (фиг. 10). Эти трубы имеют внизу в R и S два круглых отверстия диаметром в 3 или 4 линии, закрытые двумя кусками очень тонкой и очень белой бумаги. Два другие конца снабжены также круглыми отверстиями, в точности одинакового размера, диаметром, например, в 1 дюйм, предназначенными для свободного доступа света. Одна из этих труб состоит из двух частей, входящих друг в друга; удлинение или укорочение этой трубы оказывает в точности то же действие, какое оказывало бы и



Фиг. 10.

уменьшение или увеличение отверстия D в том же самом отношении, ибо это отверстие будет отвечать большему или меньшему участку неба.

Если угодно определить с помощью этого прибора, насколько один участок неба посылает нам света более, чем другой, имея большее или меньшее возвышение или будучи более или менее удален от солнца, то достаточно поставить обе трубы под определенным углом друг к другу и направить их на эти два участка неба; нижние концы труб следует вставить в более широкую трубу длиной в семь-восемь дюймов, в которую смотрят, приспособив ее по форме к очертаниям лба и части лица вокруг глаз так, чтобы защитить себя от всякого иного света, кроме того, который исходит из двух светящих точек R и S. Часто бывает необходимым, чтобы наблюдателю помогал еще кто-нибудь, на чьей обязанности было бы наводить прибор и, кроме того, удлинять или укорачивать трубу BD, добиваясь того, чтобы оба изображения R и S казались бы освещенными одинаково. Если труба AB имеет 12 дюймов длины, а другой трубе пришлось придать длину в 15 дюймов, то это равносильно уменьшению диаметра отверстия D в отношении 15 к 12, или 5 к 4. Отверстие D будет посылать свет, ослабленный в отношении 25 к 16, и это будет служить указанием на то, что участок неба, отвечающий отверстию D, в действительности ярче другого участка в этом же отношении.[22]

Этот же прибор послужит для определения различных степеней силы света, посылаемого нам земными телами в том случае, когда они являют собой достаточно большие поверхности и каждое из них равномерно по цвету. Чем сильнее тело освещено или чем более света оно нам отбрасывает, тем более следует удлинить направленную на него трубу BD. При удлинении этой трубы ее отверстие будет отвечать меньшей части тела и светящая точка S будет освещена слабее. Когда обе наблюдаемые светящие точки R и S будут иметь одинаковую силу, достаточно, как обычно, взять квадраты длин обеих труб; частное

от деления их обратных величин покажет нам, в каком соотношении находятся интенсивности света сравниваемых тел.

Для того чтобы наблюдение удалось, необходимо, однако, чтобы тела посылали достаточное количество света, дабы последний был заметен на обоих кусках бумаги или матовых стеклах, прикрывающих отверстия R и S. Необходимо также, чтобы эти тела были достаточно большими и захватывали угол значительно больший, чем тот, который образует каждое отверстие A или D, рассматриваемое с противоположного конца трубы. Действительно, если каждое из тел видно под углом лишь в 2 или 3 минуты и если при удлинении трубы BD величина ее отверстия может быть сведена всего к 7 или 8 минутам, то тело будет всегда, так сказать, занимать лишь середину отверстия. Обе наблюдаемые светящие точки R и S будут, следовательно, получать всегда одно и то же число лучей, несмотря на удлинение трубы, и нам не удастся установить для этих двух светов градацию, необходимую для их измерения. Чтобы не придавать в этом случае прибору огромных размеров или не уменьшать слишком сильно отверстие D трубки DB, что привело бы к новым затруднениям, не остается ничего иного, как обратиться к другому способу, который мы сейчас предложим.

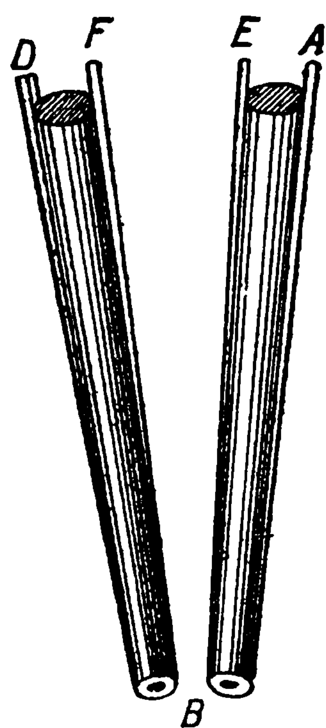
ГЛАВА VII

Второй способ употребления стеклянных чечевиц или объективов зрительных труб для измерения света

Вместо того, чтобы изучать свет на большем или меньшем расстоянии от фокуса стеклянных чечевиц, через которые его пропускают, дабы увеличить или уменьшить его силу, как это уже было объяснено в первой и второй главах, достаточно собрать свет точно в фокусе и изменять его силу, увеличивая и уменьшая отверстие чечевицы. Мы нарочно выберем для этого чечевицы с небольшой выпуклостью; мы сможем даже воспользоваться объективами наших наиболее длинных

астрономических труб; поскольку изображения будут большими, будет легче выбирать и разделять участки, яркость или силу которых желательно сравнивать.

На фиг. 11 представлен прибор. Два совершенно одинаковые объектива AE и DF прилажены к двум трубам, и фокусы их приходятся на нижние концы труб, отстоящие на 6 или 7 футов от стекол или на 10—12 футов. В крышках, закрывающих нижние концы труб, проделаны в каждой небольшие отверстия, диаметром в 3 или 4 линии, которые закрываются в свою очередь кусками очень белой бумаги или матовыми стеклами. Когда прибор изготовлен, остается лишь направить оба объектива на предметы, предназначенные к сравнению. Эти предметы вырисовываются на дне труб, причем мы видим только отдельные части их, соответствующие двум кускам бумаги; для того чтобы лучше их различать, следует удалить весь посторонний свет, вставляя концы обеих зрительных труб в более широкую трубу, к которой прикладывается глаз, то есть следуя совету, данному нами ранее, когда речь шла о приборе, изображенном на фиг. 10. Если оба наблюдаемые предмета не одинаково ярки, если один значительно ярче другого, то их уравнивают, уменьшая отверстие одного из объективов; полученные площади обоих стекол укажут тогда отношение, существующее между обеими различными ступенями света.

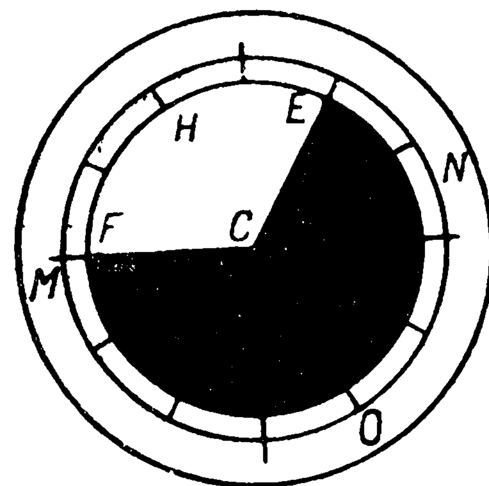


Фиг. 11.

Следует, однако, заметить, что в наблюдениях подобного рода существует только один правильный способ уменьшения отверстия объективов. Поскольку величина поверхности стекла должна выражать количество лучей, которые через него проходят, не следует закрывать только средние части объектива или только его края; первые, будучи более толстыми, менее прозрачны, чем вторые; их следует закрывать пропорционально,

для чего надлежит воспользоваться диафрагмами, имеющими в точности форму секторов.

Мы изобразили на фиг. 12 один из таких частично закрытых объективов; он окружен кольцом или круглой диафрагмой *MNO*, по всей окружности которой мы нанесли относительные деления. Другие диафрагмы, вырезанные в виде секторов, введены между круглой диафрагмой и самим стеклом; заставляя их скользить друг по другу, можно сделать бездействующей любую желаемую часть объектива. Если секторы расположены так, как это изображено на нашей фигуре, то свет проходит лишь через участок *FCEH*, равный в точности четырем двенадцатым всей площади стекла, и, следовательно, уменьшается в этом же отношении.



Фиг. 12.

Если бы все предметы, предназначенные для наблюдения, находились почти в одном и том же направлении, то две длинные трубы можно было бы заменить одной. Наверху можно было бы оставить объективы, помещенные друг около друга, а снизу достаточно было бы одного окуляра. Такой прибор не отличался бы от прибора, который я передал в руки астрономов в 1748 г. и которому я дал имя *гелиометра* или *астрометра*, — прибора, который Лондонское королевское общество воспроизвело в 1753 г. почти в том же виде, уверяя, что он был предложен ему на несколько лет ранее. Я льщу себя не столько тем, что здесь я встретился с искусным английским оптиком, сколько тем, что я явился причиной воздания должного его заслугам, ибо его открытием, как видно, пренебрегли, словно оно не было достаточно ясно объяснено или значение этого открытия не было достаточно понято. Оно, по всей вероятности, осталось бы в самом глубоком забвении, если бы предложенный мною гелиометр не напомнил о нем.

В этой коллизии произошло почти то же самое, что и с изобретением микрометра в прошлом веке. Он был задуман в Англии, однако поскольку все, что тогда было сделано, осталось совершенно не известным публике, изобретение должно было, до известного времени, считаться совершенно бесполезным или как бы не сделанным. Таким образом, мы обязаны в действительности этим изобретением гг. Озу и Пикару и исключительно им одним.[23]

Я полагаю также, что мне обязаны гелиометром, поскольку я ничего не позаимствовал в этом изобретении от наших ученых соседей, которые сами полностью упустили из виду или даже пренебрегли идеей, почти совпадающей с той, которая им была сообщена. Я изобрел этот второй прибор лишь затем, чтобы иметь возможность точно измерять небесные расстояния, несколько превосходящие те, которые измеряются первым прибором; однако можно видеть, что я даю ему еще и другое употребление, могущее стать весьма важным. Можно оставить в гелиометре лишь его объективы; это упрощает одновременное наблюдение обоих изображений и избавляет от тех трудностей, которые возникают вследствие необходимости наблюдать эти изображения через одинаково толстые участки окуляра.[24]

ГЛАВА VIII

Пользуясь приборами, изображенными на фиг. 10 и 11, измеряют непосредственно интенсивность света, а не полное его количество

Помимо уже сказанного, легко заметить, что с помощью этого прибора мы измеряем не абсолютные количества света, а лишь его интенсивности, то есть количества лучей, отнесенные к поверхности светящего тела; то же самое имеет место, когда мы пользуемся прибором, изображенным на фиг. 10. Следует всегда четко различать абсолютное количество и интенсивность света. Абсолютное количество зависит как от того,

насколько лучи близки друг к другу или насколько они уплотнены или сжаты, так и от величины поверхности тела, которое нам светит; интенсивность же выражает лишь бо́льшую или меньшую сгущенность лучей, независимо от их общего количества.[25]

Если светящее тело кажется при рассматривании очень ярким, то интенсивность его света будет большой, однако может статься, что при всем том это светящее тело будет освещать очень мало, ибо поверхность его мала. Равным образом возможно и обратное: интенсивность света может оказаться очень малой, и, тем не менее, светящее тело распространяет много света, если поверхность его велика. Это имеет отношение к тому, что мы говорили по поводу освещенной солнцем стены: если удаляться от нее, то ее цвет будет казаться одинаково сильным, или, выражаясь иначе, интенсивность ее света останется всегда одной и той же, хотя эта стена может отражать большее или меньшее абсолютное количество света. Белизна стены сохраняет в точности ту же степень, ибо число лучей, воспринимаемых глазом, пропорционально величине изображения, образующегося на сетчатке.

Мы позволим себе добавить, для большей ясности, что в наблюдениях, представленных фиг. 2, мы сравнивали абсолютные силы светов, а не их интенсивности, ибо мы получали лучи от всех частей поверхности светящего тела сразу; мы не исследовали, насколько яркой кажется поверхность пламени; мы наблюдали целиком весь свет, который мы от него получали.

Теперь мы становимся на другую точку зрения: мы рассматриваем лишь определенную часть поверхности светящего тела, и выражение, которое мы находим для силы света, относим к видимой поверхности этой части. Таким образом, вместо того, чтобы говорить о полном количестве света, мы ищем непосредственно его интенсивность; мы исследуем, посылают ли участки двух светящих тел или двух предметов, имеющих равную видимую протяженность, равные количества света. Очевидно, что результаты должны быть разными, смотря по тому, в каком

из двух различных смыслов решается задача; впрочем, помимо того, что каждое из этих решений имеет свою ценность, не составляет труда перейти от одного из них к другому.

Если известна интенсивность света, то достаточно умножить ее на величину поверхности светящего тела, предполагая, что оно находится всегда на одном и том же расстоянии, для того чтобы получить абсолютное количество света. Если, напротив, известна эта последняя величина, то достаточно разделить ее на величину поверхности светящего тела, чтобы получить интенсивность, или степень силы воздействия, на каждый участок нашей сетчатки.

Наконец, если два предмета или светящих тела находятся на расстояниях, сильно отличающихся друг от друга, то следует несколько изменить длину зрительных труб с тем, чтобы оба изображения получались на дне труб одинаково отчетливыми; при этом силы или интенсивности света не будут определяться точно отверстиями объективов. Расстояние от предмета до объектива не влияет на силу света, если воздух достаточно прозрачен. Если предмет находится на значительно большем расстоянии, то часть его, освещающая дно зрительной трубы под тем же углом, будет значительно большей, причем увеличение этой части будет в точности компенсироваться меньшим числом лучей, которое каждая точка ее посылает в объектив. Число лучей, попадающих в зрительную трубу от кажущихся равными частей предмета, будет всегда одним и тем же, несмотря на бóльшую или меньшую удаленность предмета. Однако это одинаковое количество света, проходящее через объектив и пропорциональное величине его отверстия, должно затем в той или иной мере терять в интенсивности, сообразно с тем, что свет будет проходить более или менее далеко и распределяться по большей или меньшей поверхности в фокусе. Чем больше ослабляется свет по этой второй причине, тем меньше надлежит ослаблять его, уменьшая отверстие объектива, для того чтобы сделать оба изображения одинаково яркими. Таким образом, принимая во внимание все вышесказан-

ное, мы видим, что интенсивности света, которые мы наблюдаем, обратно пропорциональны отверстиям объективов и прямо пропорциональны квадратам длин зрительных труб.[26]

ГЛАВА IX

Сравнение изложенных способов измерения света со способами, предложенными различными авторами

Мы закончим описание различных способов, которыми можно пользоваться для измерения света, сравнением их с методами, предложенными некоторыми авторами. Читатель мог видеть, что мы взяли за правило всегда приводить оба света к совершенному равенству путем усиления более слабого или ослабления более сильного. В одних случаях мы заставляли их претерпевать эти изменения непосредственно перед местом их восприятия, в других — мы увеличивали или уменьшали их силы по их выходе из светящих тел; однако какого бы порядка мы при этом ни придерживались, окончательный результат оставался одним и тем же; как известно всем читателям, в каком бы порядке ни были расположены перемножаемые величины или отношения, их произведение всегда остается одним и тем же.[27] Мы полагаем, что это правило, заключающееся в том, чтобы неукоснительно приводить все к соотношению равенства, не может быть заменено никаким иным, ибо соотношение равенства есть единственное, дающее нам уверенность в том, что мы не подвергаемся опасности совершать грубейшие ошибки.

Вообще, чувства наши даны нам не для того, чтобы в точности показывать, насколько различные причины наших ощущений сильнее друг друга; они премудро приуготовлены к тому, чтобы просто отмечать различия тех отношений, в которых эти причины с нами находятся. Сами причины могут отличаться весьма сильно, но если это различие едва ощутимо, оно еще не представляет для нас интереса, оно нам ничем не угрожает.

В равной степени возможно, что чрезвычайно малое различие отвечает весьма различным ощущениям, ибо это небольшое увеличение воздействия бывает иногда в состоянии вызвать изменение наших конституционных свойств; а потому существенно для нашего самосохранения, чтобы мы были об этом во-время предупреждены.[28]

Иначе, однако, обстоит дело в том случае, когда обе причины воздействуют на наши чувства с умеренной силой, когда они действуют одновременно на один и тот же орган, когда впечатления, создаваемые ими, кажутся нам одинаково сильными и когда все прочие обстоятельства совершенно одинаковы; нельзя сомневаться, что в этом случае причины будут очень близки к тождественности. Это будет доказано в отношении света в первом из опытов, описанных в следующем разделе.

Таким образом, мы не напрасно настаивали на всех предосторожностях, способствующих приведению к совершенному равенству тех величин, которые нам надлежит сравнивать. Недостаточно рассматривать одновременно оба света, соотношение между которыми мы хотим определить и которые мы уравниваем; необходимо наблюдать их под одинаковым углом наклона, а также, как мы настоятельно рекомендовали, ограничивать их с помощью диафрагм или иным способом в пространствах одинаковой кажущейся величины и формы. Кроме того, необходимо сделать их столь близкими друг к другу, чтобы на сетчатке они казались соприкасающимися. Если при этом мы исследуем их в помещении, затянутом черной материей или просто достаточно темном, позаботившись в то же время о том, чтобы наблюдение велось через отверстие, проделанное в последней диафрагме, закрывающей от нас все прочие предметы, и они кажутся нам одинаково сильными, то нам, очевидно, остается лишь учесть все изменения, которым мы их подвергали, желая уравнять их, дабы узнать с достаточной точностью, какова была их начальная сила.

Многочисленные способы, которые предлагали нам для измерения света разные ученые, оказались весьма несовершенными

лишь потому, что одно или несколько из этих существенных обстоятельств были упущены. Г-н Гюйгенс в своем трактате, озаглавленном „Космотеорос“ (книга II), сообщает, что для сравнения света Солнца со светом звезды Сириус он рассматривал первое из этих светил через длинную трубу, вверху которой имелось лишь очень малое отверстие, и добивался того, что оба света казались одинаково сильными. Однако помимо того, что сей ученый математик, должно быть, не делал тогда должного различия между абсолютными силами светов и их интенсивностями, совершенно очевидно, что мы можем судить непосредственно о живости двух ощущений лишь в том случае, когда они воздействуют на нас одновременно. Как иначе увериться в том, что столь деликатный орган, как глаз, находится неизменно в одном и том же состоянии, что он не более чувствителен к слабому впечатлению в одно время, чем в другое? И как вспомнить силу первого ощущения, испытывая второе, если их разделяет промежуток в несколько часов или в несколько дней? Таким образом, для того чтобы преуспеть в этом определении, надлежало бы воспользоваться вспомогательным светом, которым можно было бы располагать в обоих наблюдениях и который служил бы общим источником сравнения.[29]

Мы вынуждены указать почти на те же недостатки способов, описанных парижским капуцином Франсуа Мари в небольшой книге, которую он издал в 1700 г. под названием „Новое открытие, касающееся света“. Эта книга была мне неизвестна в 1729 г., когда я выпустил свой труд, озаглавленный „Опыт о градации света“, и я не упоминал в то время о ней. Сей добрый монах полагал, что, накладывая несколько кусков стекла одинаковой толщины один на другой или заставляя лучи отражаться многократно от зеркал, можно получить шкалу ослаблений с совершенно одинаковыми ступенями, которые будут подобны членам убывающей арифметической прогрессии; желая оценить силу света, он определял, каково число кусков стекла или различных зеркал, потребное для полного исчезно-

вения света. Франсуа Мари заблуждался, полагая эти ступени света равными, подобно многим другим, впавшим в ту же ошибку; еще более неправильным делало этот способ то, что он им дурно пользовался. Его результаты должны были зависеть в большей или меньшей степени от прозрачности этих кусков стекла и, кроме того, от различного состояния его глаз, которые обладали в разное время разной чувствительностью. Когда зрение его было несколько утомлено, все света должны были казаться ему более сильными. Тогда ему требовалось большее число кусков стекла, чтобы добиться того же ослабления. Следовательно, каждый наблюдатель приписывал бы измеряемому свету неодинаковую ступень. Производя измерения в разное время или в различных местностях, нельзя было бы получить согласных результатов, и измерения никогда не привели бы к точным соотношениям.[30]

Способ, описанный в 1735 г. знаменитым шведским астрономом г-ном Цельзием в „Истории королевской Академии наук“, нисколько не лучше, а, пожалуй, даже хуже. Его способ связан с суждением о четкости, с которой мы обнаруживаем самые малые предметы, находящиеся на различных расстояниях, смотря по тому, насколько сильно они освещены; однако он не обратил внимания на то, что подчинить это различение определенному закону еще более трудно, чем измерить саму силу света. Он утверждал, что для того, чтобы видеть некоторый малый предмет, в два раза более удаленный, столь же отчетливо, он должен быть освещен в 256 раз сильнее, в соответствии с восьмой степенью расстояния; однако очевидно, что если некто, обладающий весьма близоруким зрением, с легкостью читает в темном месте мелкие буквы с расстояния в 4 или 5 дюймов, то никакой свет в мире не даст ему возможность обнаружить эти буквы с расстояния в 14 или 15 дюймов, по крайней мере в том случае, если его глаза не устроены совершенно особенным образом. Мы одарены способностью отчетливо видеть лишь в очень узких пределах. Мы видим достаточно хорошо все предметы в пределах опре-

деленного протяжения; однако если удалять их от нас или если значительно приближать их к нам, то самого сильного света не будет достаточно, чтобы дать нам возможность замечать их мелкие детали, поскольку недостаток различения будет проистекать при этом не из меньшего числа лучей, а из особенностей их направления, являющихся причиной того что они не будут давать на сетчатке достаточно резкого изображения.

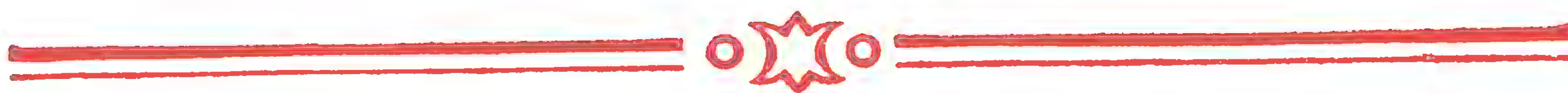
Согласие пропорции, указанной г-ном Цельзием, с опытом может быть, таким образом, лишь редчайшим случаем. Если эта пропорция оказалась годной для данного астронома, то это не значит, что она будет такой для наблюдателей, глаза которых устроены иначе, чем его глаза. Она должна была, к тому же, становиться неверной даже для него, всякий раз, когда расстояния становились значительно более короткими или длинными, чем те, которыми он пользовался для того чтобы установить свое мнимое правило.[31]

Ничто подобное не грозило нам в тех способах, которыми мы пользовались; так как мы рассматривали лишь количество света или его блеск, то для нас не было важно, дальнозорок или близорук наблюдатель и обладает ли он хорошим или плохим зрением. Если лучи пересекаются прежде, чем они достигнут сетчатки, или если они соединяются позади нее, их действие на дно глаза не оказывается более слабым, ничто не теряется, и сила впечатления, создаваемого ими, остается всегда одной и той же.

Мы не видим никаких других препятствий к применению наших правил, если не считать того, что света, которые надлежит сравнивать, могут иметь различные цвета. В этом случае проблема допускает различные решения, будучи многосторонней по существу. Можно задаться вопросом, насколько один из светов способен сообщать тепла более, чем другой; при этом следует обратиться к опытам, совершенно отличным от тех, о которых идет речь в этом трактате. Если, напротив, дело идет о четкости, с которой при свете различных цветов можно

видеть предметы, то следует прибегнуть к нашим методам, причем достаточно обратить внимание на то, чтобы расстояния от глаза до предметов были в точности одинаковыми, дабы не впасть в то же затруднение, что и г-н Цельзий. Сравнение двух светов различного цвета, производимое описываемым способом, затруднительно по самому существу, когда его надлежит выполнять с большой тщательностью, то есть в том случае, когда обе силы близки к тому, чтобы быть равными. Однако существует точка, в которой один из двух светов кажется несомненно более ярким, чем другой, и другая точка, где этот свет кажется более слабым. Таким образом, достаточно взять среднее из этих двух значений.[32]

Наконец, правила, которые мы предлагаем, крайне просты и основаны лишь на хорошо известных принципах, несмотря на то, что требуемые нами предосторожности делают их применение несколько более сложным. Однако достаточно воспользоваться одними этими правилами, чтобы получить весьма достопримечательные сведения и разыскать различные явления, которые безуспешно пытались обнаружить или которые еще не догадывались искать.



РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ПРИЛОЖЕНИЯ ИЗЛОЖЕННЫХ СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТА К РЕШЕНИЮ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ОПТИКИ

ГЛАВА I

Наблюдения, сделанные для определения того, какова должна быть сила света, при которой другой, более слабый свет перестает быть видным

Мы ставим во главу всех наших наблюдений те, из которых мы узнали, какую силу должен иметь свет, дабы сделать своим присутствием совершенно неощутимым действие другого света, много более слабого. Все наши органы чувств, как наиболее тонкие, так и наиболее грубые, ограничены почти одинаковым образом. Подобно тому, как сильный шум мешает нам слышать другой шум, более слабый, мы не видим в присутствии сильного света другой свет, значительно меньшей интенсивности, когда оба света падают на одно и то же место нашей сетчатки.

Поставив свечу на расстоянии одного фута от очень белой поверхности, я поместил рядом со свечой линейку некоторой ширины и затем удалял на различные расстояния другую свечу той же величины, что и первая, до тех пор, пока я не перестал различать тень линейки, даваемую второй свечой. Тень была весьма заметной, пока я не относил свечу далее 4 или 5 футов от поверхности. Вся площадь, которую занимала эта тень, была

при этом освещена первой свечой; но рядом с этой площадью света было, благодаря лучам второй свечи, на одну шестнадцатую или на одну двадцать пятую часть более, и это увеличение было очень заметным. Оно было еще слегка видимым, когда я относил вторую свечу на 6 или 7 футов, и, наконец, исчезало или, говоря иначе, мне казалось, что вся поверхность имела совершенно одинаковую белизну, когда я помещал эту свечу на расстоянии приблизительно 8 футов. Таким образом, различие между двумя светами переставало быть заметным, когда небольшая прибавляемая часть была приблизительно в 64 раза более слабой, нежели первая часть. Я мог бы получить без труда оба сравниваемых света от одного и того же светящего тела, но я повторял опыт много раз и менял свечи местами, с тем, чтобы убедиться, что они светят одинаково.

Наблюдатели, которые будут производить этот опыт, без труда смогут осуществлять его самыми различными, вполне равноценными способами, но отношения, которые они найдут, будут, без сомнения, несколько отличаться, сообразно различному устройству их глаз. Я не заметил, чтобы это отношение менялось при сильном увеличении яркости света, если только блеск оного был легко переносим, хотя, впрочем, при этого рода сравнениях полезно с самого начала придавать светам умеренную силу, заставляя их претерпевать равные или, лучше сказать, пропорциональные уменьшения. Как бы то ни было, каждый наблюдатель легко может определить точную степень тонкости своего зрения, распознать наиболее чувствительные участки своей сетчатки и судить о точности, которой он может достигнуть в своих наблюдениях. При сравнении света я должен опасаться ошибки лишь на одну шестидесятую часть, тогда как для другого наблюдателя она составит, быть может, одну восьмидесятую часть.

Не следует, однако, думать, что все наблюдения будут столь же успешными. Они могут быть подчас гораздо менее точными, и это как раз то, чего я, признаюсь чистосердечно, опасаюсь в отношении многих собственных моих наблюдений.

Не говоря о том, что следует всегда проводить строгое различие между очень простыми опытами и теми, которые в силу своей сложности требуют большого числа частных и последовательных сравнений, надлежит, дабы достигнуть известного успеха, производя лишь одно наблюдение, уделять ему значительное время и прилагать порою значительное старание. Следует, разумеется, стремиться достичь той точности, пределы которой мы только что указали; ее полезно всегда иметь в виду, хотя получить ее возможно лишь в редких случаях.

Часто случается, что не удается устранить все посторонние лучи: какой-либо слабый отблеск примешивается к лучам, силу которых сравнивают; лучи не удается достаточно тесно сблизить; они имеют слишком разные цвета; наконец, дно глаза наблюдателя, не говоря даже о точке, в которой входит зрительный нерв, может не иметь повсюду одинаковую чувствительность.[33]

Возвращаясь к отношению, при котором один свет исчезает в присутствии другого, следует заметить, что приложения его весьма обширны. Все наши читатели замечали, что, находясь в сильно освещенном месте, можно лишь с величайшим трудом различить то, что происходит в месте затемненном; оконное стекло, залитое солнцем, мешает порою видеть предмет, находящийся, хотя и снаружи, но в тени. Стоя около бассейна, полного воды, мы часто не различаем дна. Это происходит по той же причине, а именно потому, что слишком слабый свет, посылаемый нам дном, затушевывается светом дня и тем светом, который отражается самою водою. В тех случаях, когда впечатление, производимое последними на наши глаза, не превышает более, чем в 15 или 20 раз, впечатления от света, идущего со дна бассейна, оно не мешает нам видеть дно; мы видим его сквозь посторонний свет, словно сквозь вуаль или дымку; однако мы полностью перестаем его различать, когда впечатление, вызываемое всем посторонним светом, становится в 80 или 100 раз более сильным.

То же самое получается иногда в тех случаях, когда наши глаза не подвергаются непосредственному действию света,

а лишь сохраняют впечатление об оном. Наша сетчатка являет некоторое сходство с теми фосфорами, которые как бы пропитываются светом, действию которого они подвергаются. Если свет очень слаб, то действие его должно быть повторным, дабы оно могло оказать заметное влияние. С другой стороны, лучи, падающие на дно глаза, вызывают в нем раздражение, которое может сохраняться долгое время после того, как мы перешли в затемненное место, и наши глаза находятся в том же состоянии, как если бы они все еще подвергались действию некоторого света. Если при этом произведенное впечатление было много более сильным, чем то впечатление, которое производит на нас предмет, находящийся в темноте, то мы обнаружим последний не сразу, а начнем замечать его лишь после того, как раздражение сетчатки, ослабляясь, перестанет превышать в 60 или 80 раз интенсивность слабого свечения предмета. Некоторые участки затемненной области могут быть освещены более других, и темнота имеет нередко бесчисленное количество степеней глубины; совершенно очевидно, что тени заставляют другие участки выступать более отчетливо. Если, однако, сохранившееся в нас впечатление от наружного света все еще слишком велико, то мы не только не обнаружим затененные части предметов, но не различим даже и наиболее освещенные из них. Собственно говоря, мы видим лишь преобладающий свет, все еще сохраняющийся в наших глазах, действие которого, однако, непрестанно убывает, повидимому, подобно членам геометрической прогрессии.[34]

ГЛАВА II

Опыты над отражением от зеркал

Я произвел большое число опытов, наблюдая, каково количество света, отражаемое зеркалами, по сравнению с количеством света, получаемого ими. Я ограничусь здесь, однако, в качестве примера упоминанием об одном или двух опытах, имея в виду изложить их подробнее в дальнейшем. Выбрав

кусок очень чистого стекла в линию толщиною, я покрыл его амальгамою и нашел, с помощью устройства, изображенного на фиг. 4 и описанного в третьей главе предыдущего раздела, что отражение ослабляет свет в отношении 2809 к 1764 или 1000 к 628, когда углы падения и отражения составляют 15°.[35] Поместив дощечку *D* на расстоянии 42 дюймов от свечи, я был вынужден отнести другую дощечку *E* на 53 дюйма, дабы обе они, рассматриваемые одна непосредственно, а другая после отражения, имели одинаковую белизну. При этом свет, отраженный зеркалом, относился к свету, получаемому им, как квадрат 42 к квадрату 53. Второй свет выражался величиной 1/2809, являющейся единицей, деленной на квадрат 53, а первый свет — величиной 1/1764, являющейся единицей, деленной на квадрат 42.

Отражение казалось мне менее ярким, когда я брал зеркало из великолепно отполированного металла; помещая более удаленную дощечку на расстоянии 53 дюймов от свечи, я должен был отнести вторую дощечку *D* всего лишь на 40 дюймов. Таким образом, это зеркало, отражая при угле падения в 15°, уменьшало свет с 1000 ступеней до 561.[36]

Когда я делал углы падения и отражения много меньшими, отражение существенно возрастало. Я заметил, что при угле в 3° стеклянное зеркало возвращало приблизительно 700 из 1000 лучей, которые оно получало, и что в случае металлического зеркала ослабление было еще несколько меньшим. Я подтвердил эти два наблюдения, расположив одно за другим два совершенно одинаковых зеркала, от которых происходили два последовательные отражения. Их действие при этом как бы удваивалось, что облегчало его точное определение. Малость угла порождала, однако, новые трудности, которые следовало преодолевать. Даже на металлическом зеркале, несмотря на совершенство его полировки, получалось множество изображений, и оно казалось как бы волнистым; это вынуждало меня располагать дощечки на очень малых расстояниях.

ГЛАВА III

Наблюдения над прозрачностью простого и зеркального стекла

Этот эксперимент был одним из первых, произведенных мною перед составлением моего „Опыта о градации света". Я хотел найти, во сколько раз уменьшается свет, проходя через 16 кусков обычного оконного стекла, имевших в совокупности толщину в $9\frac{1}{2}$ линий. Я велел установить ночью, на достаточно большом от меня расстоянии и в разных местах, светильник и свечу и заставлял свет последних проникать через два разных отверстия в особую коробку, на дно которой оба света падали раздельно и с одинаковым наклоном. Я мог судить об их силе, наблюдая через проделанное мною третье отверстие. Сначала я удалял или приближал светильник и свечу до тех пор, пока мне не начинало казаться, что они освещают одинаково; заставляя затем проходить свет светильника через мои 16 кусков стекла, я нашел его столь слабым, что был вынужден для восстановления равенства отнести свечу на расстояние в $15\frac{1}{2}$ раз большее, то есть на расстояние, уменьшавшее свет в $240\frac{1}{4}$ раза. Таким образом, ясно, что 16 кусков стекла ослабляют свет в 240 раз, поскольку свет светильника претерпевает вследствие их введения то же изменение, что и свет свечи, который должен стать в 240 раз слабее, когда я воспринимаю его с расстояния в $15\frac{1}{2}$ раз большего.

Я проделал затем тот же опыт несколько иным образом. Я заметил, что свет луны был равен свету сальной свечи, удаленной от меня на 27 футов; однако после прохождения моих 16 кусков стекла свет луны стал равным всего лишь свету той же сальной свечи, воспринимаемому с расстояния, равного приблизительно 430 футов. Свет сальной свечи на этом втором расстоянии был приблизительно в 254 раза слабее, чем свет на первом расстоянии, ибо 729 и 184 900 суть ква-

драты 27 и 430, а второй из этих квадратов приблизительно в 254 раза более первого. Таким образом, согласно этому второму опыту, свет, проходя через наши 16 кусков стекла, становился в 254 раза слабее, тогда как в первом опыте он ослаблялся лишь в 240 раз. Можно взять среднее из этих двух опытов и сказать, что свет уменьшался приблизительно в 247 раз.

Стекла, которыми я пользовался в ту пору, были самыми обычными, и я захотел в последнее время узнать, какова прозрачность стекла, из которого изготовляют наши зеркала и наши очки. Этот материал часто бывает покрыт тонкой цветной пленкой, несколько вредящей его прозрачности. Шесть кусков, совокупной толщиною в $11\frac{1}{2}$ линий, ослабляли свет лишь в отношении 10 к 3. Я установил это способом, изображенным на фиг. 5, а также проверил это дважды в камере-обскуре, через два отверстия которой я заставлял проникать дневной свет. Один из этих светов проходил сквозь шесть кусков стекла, и для того чтобы сделать его равным другому свету, воспринимавшемуся непосредственно, надобно было сделать отношение между двумя отверстиями равным 331 к 100. В другой раз мне показалось, что свет ослаблялся не в отношении 100 к 30, а в отношении 100 к 27, и я убежден, что последнее из этих определений является наиболее точным.

Можно найти и более прозрачное стекло; я видел один кусок толщиною в три дюйма, который ослаблял свет едва на половину. Впоследствии я, однако, установил, что это достоинство проистекало главным образом оттого, что эта масса являла собою один сплошной кусок и не была разделена множеством плоскостей.[37]

ГЛАВА IV

Опыты над прозрачностью морской воды

Поставив себе целью исследовать прозрачность морской воды, я велел сделать из досок жолоб, концы которого были закрыты двумя кусками стекла, поставленными перпендикулярно

длине жолоба. Этот жолоб имел приблизительно полфута ширины и 115 дюймов или 9 футов 7 дюймов длины, что соответствовало всей длине досок. Я велел затем отнести на очень большое расстояние, ночью, зажженный светильник, свет которого я заставил проходить сквозь жолоб, и расположил неподалеку зажженную свечу, дабы найти, на каком расстоянии свет ее будет казаться равным свету светильника. Дабы лучше судить об их равенстве, я принимал их на одну и ту же поверхность друг возле друга и с одинаковым наклоном и добивался того, чтобы никакой посторонний свет не был помехой. Я прибегал также к помощи глаз всех присутствовавших при сем лиц. После того, как, удаляя или приближая свечу, я нашел, что ее следовало поместить на расстоянии в 9 футов, я велел наполнить жолоб морскою водою, и она, как это можно было предвидеть, значительно ослабила свет светильника, который сделался равным свету свечи лишь после того, как последняя была отнесена на расстояние в 16 футов.

Отсюда следует, что толща морской воды в 115 дюймов ослабляет свет, приблизительно, в три раза, ибо то, что квадрат 16 равен, примерно, утроенному квадрату 9, означает, что свеча, свет которой служил мне мерилом, освещает в первом случае в три раза сильнее, нежели во втором. Я производил этот опыт несколько раз, причем оказалось, что если взять среднее из всех измерений, то ослабление света оказывается несколько меньшим, а именно происходит лишь в отношенин 14 к 5.

Я проверил эти же самые наблюдения другим способом, который должен быть значительно более точным, поскольку он требует только одного светильника и поскольку изменение силы света его, происходящее во время опыта, не оказывает влияния. Отнеся светильник на большое расстояние, я заставил свет его проходить через пустой жолоб. Свет претерпевал некоторое уменьшение уже на этом пути, вследствие наличия двух кусков стекла по обоим концам жолоба; уменьшение стало, однако, гораздо более значительным, когда я наполнил канал морскою водою. Оставалось, следовательно,

найти, в каком отношении происходит это новое уменьшение, поскольку оно проистекает единственно от недостатка прозрачности воды. Для этой цели я сравнивал свет светильника, проходивший в обоих случаях сквозь жолоб, со светом того же светильника, прошедшим сквозь выпуклое очковое стекло. Воспринимая последний свет на большем или меньшем расстоянии от фокуса, я мог ослаблять его в разной степени. Иными словами, вместо того, чтобы, как ранее, брать в качестве мерила свет свечи, я пользовался светом самого светильника, заставляя его проходить сквозь выпуклое стекло.

Нетрудно понять, что я должен был ставить это стекло рядом с жолобом и что, таким образом, оба света, шедшие от светильника и проходившие сквозь жолоб и выпуклое стекло, падали друг возле друга приблизительно перпендикулярно на воспринимавшую их поверхность, на которой я и должен был исследовать их равенство. Когда жолоб был пуст, свет, проходивший сквозь него, был равен свету, который пропускался сквозь выпуклое стекло и который я воспринимал на расстоянии восьми дюймов от фокуса. Однако, когда жолоб был полон водою, свет, проходивший насквозь, был равен свету, пропущенному сквозь выпуклое стекло и воспринимаемому уже на расстоянии 13 дюймов от фокуса. Таким образом, чтобы найти уменьшение, производимое толщей в 9 футов 7 дюймов морской воды, достаточно знать, насколько свет, прошедший сквозь выпуклое стекло, слабее, когда он воспринимается на расстоянии 13 дюймов от фокуса, нежели когда он воспринимается на расстоянии лишь в 8 дюймов от фокуса, а для этого, как известно, достаточно взять квадраты обоих расстояний, 13 и 8 дюймов. Таким образом, можно найти, что уменьшение происходит в отношении 169 к 64 — отношение, достаточно близкое к отношению 14 к 5.

Только что описанные опыты были произведены с достаточною тщательностью в Круазике; они находятся в согласии друг с другом, хотя, тем не менее, я должен признаться, что я не удовлетворен ими и вижу в них существенные изъяны.

Я имел случай убедиться в этом, когда был в тропической зоне: там можно иногда видеть дно моря в местах, где глубина достигает 100 или 120 футов. Для этого необходимо, чтобы дно было покрыто белым песком и чтобы солнце стояло очень высоко. Свет солнца ослабляется на пути в 100 или 120 футов; кроме того, надлежит принимать во внимание такой же обратный путь, который должен проделать свет, дабы достигнуть глаза. Этот двойной путь оставляет, тем не менее, свету еще достаточную силу, из чего можно заключить, что морская вода, когда она очень чиста, значительно более прозрачна, чем это следует из моих опытов. У берегов Европы морская вода никогда не бывает так прозрачна, как в открытом море в местах тропической зоны, гда отлив и прилив незначительны и где море, кроме того, достаточно глубоко, чтобы волнение на поверхности не передавалось на глубину. В Круазике я брал воду в самом порту; я давал ей отстаиваться и процеживал ее сквозь полотно; следовало бы, однако, фильтровать ее с большею тщательностью. Поскольку необходимо, чтобы вода имела достаточно большую толщу, надлежит брать большое количество ее, дабы недостаток ее прозрачности был ощутимым, а это делает опыт долгим и трудным. Поэтому, быть может, было бы затруднительно добиться определения более точного, нежели то, которое я сделал, основываясь, с некоторыми допущениями, на грубом наблюдении, произведенном в тропической зоне. Мне кажется, что толща морской воды в 10 футов ослабляет свет, самое большее, в отношении 5 к 3, или, быть может, даже 5 к $3\frac{1}{2}$. Я приведу основания к тому в дальнейшем.[38]

ГЛАВА V

Наблюдения, произведенные над светом, отраженным от шероховатых поверхностей

Мы говорили об отражении, производимом зеркалами; шероховатые поверхности также отражают весьма значительное коли-

чество света, зачастую достаточное для того, чтобы освещать нас заметным образом. Я исследовал это явление главным образом в тех случаях, когда оно происходит на гипсе и на бумаге.

Я выставлял круглую гипсовую поверхность диаметром в один дюйм на свет свечи, удаленной в точности на 9 дюймов. Этот гипсовый диск имел превосходную белизну и освещался под углом в 75°. Свет составлял с диском угол во столько же градусов, отправляясь от диска в удаленную на 3 дюйма точку *P* прибора, изображенного на фиг. 1. Свет, посылаемый гипсом, был при этом весьма ощутимым. Я старался удалять с помощью ряда диафрагм посторонние лучи, однако, поскольку близость свечи делала это затруднительным и поскольку сами частицы воздуха, быть может, рассеивали некоторое количество света, я измерял свет, достигающий точки *P*, в двух случаях, а именно: убирая гипсовый диск и выставляя его сызнова на свет свечи.

Я пользовался для этой цели зеркалом, отражавшим лучи той же свечи в другую точку *Q* прибора на фиг. 1, и удалял или приближал это зеркало, пока обе точки *P* и *Q* не казались мне одинаково освещенными. Я сделал эти две точки или маленькие кружки непрозрачными; они освещались спереди лучами, отсылаемыми диском и отражаемыми зеркалом, и я рассматривал их также спереди, расположившись около зеркала. Когда я убирал гипсовый диск, точка *P* получала, как я уже указал, достаточно сильный добавочный свет.[39] Мне приходилось относить зеркало на расстояние 60 дюймов от свечи, оно было при этом удалено от точки *Q* на $54\frac{1}{2}$ дюйма, и лучи проходили, таким образом, от свечи до точки *Q* общий путь в $114\frac{1}{2}$ дюймов. Когда я, однако, ставил гипсовый диск на место, точка *P* оказывалась освещенной гораздо сильнее, и, чтобы восстановить равенство двух светов, мне приходилось помещать зеркало на расстояние всего лишь в 36 дюймов от свечи и в $30\frac{1}{2}$ дюймов от точки *Q*, что составляло для общей длины падающего и отраженного лучей $66\frac{1}{2}$ дюймов.

Во втором случае свет, отраженный зеркалом, был почти в три раза более сильным, нежели в первом случае. Оба света находятся, как известно, в отношении, обратном квадратам расстояний или промежутков, проходимых лучами; таким образом, если мы выразим первый из них через $1/13110\frac{1}{4}$ или через 76/1 000 000, что равно единице, деленной на квадрат $114\frac{1}{2}$ дюймов, то второй из них выразится через $1/4422\frac{1}{4}$ или через 227/1 000 000, что равно единице, деленной на квадрат $66\frac{1}{2}$ дюймов. Последняя же величина равна количеству света, посылаемого гипсовым диском в точку P дополнительно к посторонним светам; из этого количества надлежит вычесть величину 76/1 000 000, выражающую количество посторонних светов, и мы получим дробь 151/1 000 000, выражающую свет, отражаемый одной только гипсовою поверхностью.

Надлежит, однако, ввести еще одну весьма значительную поправку, проистекающую оттого, что зеркало, служащее нам для сравнения, не отражает всего воспринимаемого им света, а гасит часть оного. Оно уменьшает свет со 100 ступеней до 55, когда углы падения велики или когда лучи образуют с поверхностью очень большой угол. Таким образом, свет, посылаемый самим гипсовым диском, выражается не величиною 151/1 000 000, а величиною 8305/100 000 000 или 1/12 041.

После этого остается лишь обратить внимание на то, что все эти выражения суть не что иное, как отношения обратных квадратов расстояний, выраженных в дюймах. Свет, отражаемый гипсом, равен 1/12 041, в то время как свет, получаемый диском, равен 1/81, если диск удален на 9 дюймов от свечи. Отсюда следует, что гипс отражает при этих условиях 1/149 часть получаемого им света, ибо 1/12041 в 149 раз менее, нежели 1/81.

Иное получится, если существенно изменить обстоятельства опыта. Лучи, падавшие на наш диск, составляли с поверхностью угол в 75° и отсылались под углом отражения, измеряемым тем же количеством градусов. Углы,

более близкие к прямому и не равные между собою, не внесли бы особого изменения в отношение, равно как ничто особенно не изменилось бы, если бы поверхность диска была несколько увеличена или уменьшена в произвольном отношении: поверхность получала бы больше или меньше света, но отсылала бы всегда пропорционально бóльшие или меньшие его количества. Существенное влияние должны оказывать изменения расстояний от диска, на которых мы располагаемся, дабы воспринимать его свет. Если это расстояние становится в два или три раза бóльшим, то отраженный свет должен стать в четыре или девять раз меньшим, и т. д.

Опыты, произведенные мною с бумагою отличного качества, привели по существу к тому же результату, и это заставляет думать, что то же самое получится для всех тел, имеющих шероховатую поверхность и обладающих большою белизною. Каждая их часть отсылает на расстояние в три дюйма приблизительно одну 150-ю часть падающего на нее света. Свет, отсылаемый на расстояние в 10 или 20 раз большее, будет еще в 100 или 400 раз слабее и будет составлять лишь 15 000-ю или 60 000-ю часть света, получаемого маленькой поверхностью. С другой стороны, можно, если угодно, сделать поверхность значительно большей; для того, чтобы оценить общее ее действие, могущее оказаться в этом случае весьма значительным, надлежит, очевидно, найти сумму или интеграл всех маленьких светов, принимая во внимание их наклоны.[40]

ГЛАВА VI

Наблюдения над количеством света, отражаемым нам каждым участком неба или атмосферы

Мы гораздо чаще бываем освещены светом, посылаемым нам всею массою воздуха, образующего атмосферу, чем одним только вторичным светом, посылаемым нам непрозрачными телами.

Светом дня, которым мы пользуемся, мы обязаны прозрачности этой среды; однако природа устроена с такой мудростью, что небольшая непрозрачность воздуха или некоторый недостаток его прозрачности почти столь же полезен нам, как и сама прозрачность. Эта небольшая непрозрачность служит причиною того, что воздух отражает нам свет солнца и, не будь этого свойства, мы оказались бы погруженными в глубочайшую тьму всякий раз, когда мы не видим это светило или оно не освещает окружающие нас предметы прямым светом. Правда, каждый отдельный участок неба посылает нам весьма мало лучей, однако поскольку мы получаем их со всего видимого неба, образуется яркий свет, сравнимый с наиболее сильными из известных нам светов.

Интенсивность этого вторичного света весьма различна, смотря по тому, какой из участков неба мы наблюдаем. При среднем возвышении участка над горизонтом она заметно сильнее, нежели при большом. Различие выражено еще заметнее для участков, разно удаленных от солнца. Следует заметить, что соотношение между всеми этими различными интенсивностями меняется в зависимости от большей или меньшей высоты солнца.

Атмосфера весьма ярка вплоть до расстояний в 3 или 4° от солнца; далее различия в свете становятся по большей части менее ощутимыми, и необходимо крайне напрягать внимание, дабы заметить их. Глаз, переходя без перерыва от одной точки к соседней, обычно воспринимает один и тот же оттенок света, он не различает никакого ощутимого увеличения или уменьшения, и нам представляется, в силу этой кажущейся равномерности, что те удаленные друг от друга точки, которые мы не сравниваем непосредственно и которые не могут быть охвачены одним взглядом, также имеют один и тот же оттенок. Стоит лишь, однако, воспользоваться люциметром, изображенным на фиг. 11, тем самым сблизив друг с другом самые удаленные точки небосвода, и мы окажемся

в состоянии судить о степени их света, что было бы невозможно сделать никаким другим способом. Я находил много раз, когда воздух был очень ясным и когда солнце имело приблизительно 25° возвышения, что на растоянии 8 или 9° от солнца свет неба в четыре раза сильнее, чем на расстоянии 31 или 32°, ибо мне приходилось придавать трубке, направленной на первую точку, в два раза бо́льшую длину, нежели трубке, направленной на вторую.

Иногда я придавал двум трубкам люциметра угол в 60°, располагая этот прибор таким образом, чтобы середина угла отстояла от солнца на 90°, считая по горизонту. При этом трубке, направленной ближе к солнцу, понадобилось придать... дюймов длины, в то время как длина другой трубки составляла 24 дюйма.[41]

Таким образом, две точки небосвода, удаленные одна от другой на 60° и расположенные симметрично по ту и другую стороны вертикальной плоскости, отстоящей на 90° от солнца, имеют неодинаковый свет. Свет, посылавшийся мне первой точкой, относился к свету второй, как квадрат 24 к квадрату... Эти два света относились друг к другу, примерно, как... к... Видимое возвышение солнца составляло... градусов, а обе точки небосвода возвышались на...

Особенно замечательным показалось мне, однако, то, что когда солнце имеет возвышение лишь в 15 или 20°, а наблюдаются участки неба, лежащие на одном альмукантарате, или на одной и той же высоте над горизонтом, свет неба, уменьшаясь вплоть до некоторого расстояния, откладываемого в ту и другую сторону от светила, начинает затем увеличиваться вплоть до точки, расположенной против солнца. Таким образом, на этой параллели к горизонту существуют два наименее сильно светящих участка, или два минимума, отстоящие, как я полагаю, примерно на 110 или 120° от солнца; между этими двумя одинаково удаленными от солнца минимумами лежит, напротив солнца, максимум, или более сильно светящий участок.[42]

ГЛАВА VII

Наблюдения, произведенные с целью обнаружить, насколько одна значительная часть неба освещает более другой части

Вообразив себе две вертикальных плоскости, перпендикулярные друг другу и разделяющие всю видимую поверхность неба на четыре равных части, я решил определить, насколько первая четверть, начинающаяся от солнца и простирающаяся на 90°, освещает сильнее, нежели вторая четверть неба, начинающаяся на расстоянии 90° от солнца и кончающаяся на 180°. Я расположил для этого на некотором удалении друг от друга две дощечки, я поставил их строго вертикально и перпендикулярно большой каменной стене, к которой они были прикреплены. Они были обращены в противоположные стороны, и каждая из них освещалась лишь четвертью видимой поверхности неба, ибо я дожидался того мгновения, когда солнце начинало скрываться за стеной. Я направлял затем две трубки моего люциметра на каждую из дощечек.[43] Трубки возвышались на угол приблизительно в... градусов и составляли с дощечками равные углы в ... градусов.

При этих обстоятельствах мне пришлось придать трубке, направленной на более освещенную дощечку, длину в... дюймов, в то время как другая трубка имела 24 дюйма длины. Отсюда следует, что первая четверть видимой поверхности неба испускала свет более второй в отношении... к...; таким образом, если принять свет второй за 1000, то мы получим для первого света... Солнце имело при этом... градусов возвышения. Однако если бы оно находилось выше или ниже, то только что указанное мною соотношение стало бы несколько иным; так, если бы солнце стояло выше, это соотношение было бы ближе к равенству.

ГЛАВА VIII

Найти, насколько свет солнца сильнее света, посылаемого нам значительной частью видимого неба, или насколько он сильнее, нежели тени предметов, освещенных прямыми лучами солнца

Вторичный свет, посылаемый нам атмосферою, может служить предметом бесчисленного количества других опытов, подобно тому, как он является причиной бесчисленного количества явлений, достойных самого серьезного внимания. Всякий замечал, что тени, отбрасываемые предметами, тем менее резко выражены, чем больше расстояние до них; речь идет здесь не о полутени, которая образуется вследствие того, что светящее тело обладает некоторым размерам и посылаемые им лучи не исходят из одной единственной точки. Уменьшение резкости, о котором мы говорим, обязано совершенно иной причине: оно происходит оттого, что тень, получаемая на большем расстоянии от непрозрачного тела, освещена большею частью неба, что уменьшает до некоторой степени ее черноту.

Эту разницу можно без труда заметить, исследуя тень очень высокого здания; если последнее стоит обособленно, то интенсивность его тени у подножья и очень близко к одной из его сторон менее сильна, ибо она частично разрушается светом, посылаемым по меньшей мере половиною неба. Точки в тени, более удаленные от здания, будут освещены не только первою половиною неба, но также и значительной частью другой половины, находящейся позади здания; к этому следовало, быть может, прибавить свет неба, отражаемый стенами. Наконец, крайняя часть тени, если здание увенчано башенкой или иглою, будет освещена почти всем небом, и можно впасть в ошибку, смешав ее с полутенью. Мы видим, что всегда достаточно легко определить величину участка неба, который, освещая ту или иную часть тени, делает ее менее темной или уменьшает ее интенсивность. Рассматриваемая нами тень есть не что иное, как более слабый свет.

Это — обыкновенный дневной свет, доставляемый либо всей видимою половиною атмосферы, либо какою-нибудь другою ее частью; достаточно сравнить его однажды с прямым светом солнца, дабы иметь возможность заключить об относительной силе, которую он должен иметь во всех остальных случаях.

Для того чтобы произвести это сравнение, я снова прибегнул к помощи люциметра. Я направил одну из его трубок на стену, освещенную солнцем, прикрепив к последней весьма белую дощечку. Вторую трубку я направил одновременно на другую дощечку, помещенную в тени и находившуюся в углу, где она могла освещаться лишь четвертью видимой поверхности неба.[44] Обе трубки имели одинаковый наклон относительно двух дощечек; он составлял... градусов; обе дощечки были расположены совершенно вертикально. Я ожидал, пока первая дощечка не окажется прямо обращенной к солнцу, возвышение которого составляло тогда... градусов. Мне пришлось затем придать трубке, направленной в место, освещенное солнцем, длину в... дюймов, в то время как другая трубка имела лишь 24 дюйма, дабы сделать оба света на дне прибора одинаковыми. Таким образом, солнце, при указанных обстоятельствах, освещает нас сильнее, чем четверть видимой поверхности неба в отношении... к... Та четверть неба, свет которой я наблюдал, была заключена между двумя взаимно-перпендикулярными плоскостями. Она начиналась на расстоянии 90° от солнца и кончалась на 180°.

Не следует, однако, упускать из виду, что дощечка, освещавшаяся солнцем, была в то же самое время освещена четвертью видимой поверхности неба, начинавшейся у самого солнца. Я наблюдал, следовательно, сумму двух светов, а именно света солнца и света первой четверти неба, и они в сумме были более света второй четверти неба в указанном отношении. Выражая последний через 1000, мы получим для суммы двух других... Мы уже видели, однако, в предыдущей главе, что в то время как свет второй четверти неба выражается через 1000

свет первой четверти выражается через... Отсюда следует, что достаточно вычесть величину ... из величины ..., выражающей сумму светов солнца и первой четверти неба, чтобы получить выражение света одного солнца, равное...

Предположим, наконец, что он и свет первой четверти неба производят в точности то же действие, как если бы они имели одинаковое направление. Мы будем также пренебрегать некоторыми другими обстоятельствами, на которые мы укажем в дальнейшем и которые могут быть, если угодно, учтены. Итак, число... обозначает свет самого солнца, число ... — свет первой четверти неба и число... — свет второй четверти. Достаточно, однако, воспользоваться этим расчетом, чтобы иметь возможность разрешить ту же задачу в бесчисленном множестве других случаев. Пусть, например, стена освещена прямыми лучами солнца, высота которого та же, что и прежде, и свет его попрежнему будет выражаться через ...; однако, поскольку свет первой четверти неба составляет..., свет половины неба будет равен... Таким образом, стена будет освещена светом, равным ..., а другая сторона стены, находящаяся в тени, но освещенная всею другою половиною неба, будет получать свет, выражаемый числом...; сторона стены, обращенная к солнцу, окажется освещенной приблизительно в ... раз сильнее противоположной.

ГЛАВА IX

Найти, насколько свет небесных светил увеличивается или уменьшается при изменении их возвышения над горизонтом

Это наблюдение не может быть для всех небесных светил сделано с одинаковой легкостью. Свет звезд слишком слаб, а солнца слишком силен, чтобы сравнивать его без затруднений с нашими различными земными источниками. По этой причине наблюдение это может быть произведено лишь с луною;

однако его следует проводить только во время противостояния солнцу, когда ее фаза меняется очень медленно; в этом случае можно быть уверенным, что все изменение ее света связано существенным образом лишь с ее высотою над горизонтом. В этом случае опыт отличается крайнею простотою. Я, как правило, наблюдал луну, когда она имела кажущиеся возвышения в 66° 11′ и 19° 16′. 23 ноября 1725 г. около десяти с половиною часов вечера она имела второе из указанных возвышений, и ее свет, воспринимавшийся внутри коробки, о которой я говорил в главе III, казался мне равным свету четырех сальных свечей, удаленных от меня на 50 футов.[45] На следующий день, приблизительно в три часа утра, когда луна была еще несколько удалена от меридиана и имела возвышение в 66° 11′, я исследовал ее свет во второй раз. Он оказался при этом равным свету моих четырех сальных свечей, расположенных на расстоянии 41 фута. Я без труда определил затем искомое мною соотношение, ибо квадраты двух расстояний в 41 и 50 футов равны 1681 и 2500, а поскольку эти квадраты выражают силу света сальных свечей в обоих наблюдениях, то они выражают также равные им силы света луны. Другими словами, различные силы, с которыми нас освещает луна, когда она имеет кажущиеся возвышения в 19° 16′ и 66° 11′, относятся, как числа 1681 и 2500 или, что сводится к тому же, одна из этих сил составляет, примерно, две трети другой.[46]

Наблюдая подобным образом луну при всех возвышениях, можно было бы составить таблицу, непрерывно отмечающую силу ее света; эта таблица послужила бы нам для всех остальных светил, ибо их лучи должны претерпевать при прохождении атмосферы такое же уменьшение. Я решил наблюдать луну при 66° 11′ и 19° 16′ возвышения лишь по той причине, что солнце в Круазике имеет в полдень в дни летнего и зимнего солнцестояния эти же самые кажущиеся возвышения. Это показало мне, насколько сильнее освещает нас солнце в одно время года, нежели в другое. Я иссле-

довал также неоднократно луну в момент ее захода, когда ее нижний край казался касающимся поверхности моря; я нашел, что луна освещала при этом приблизительно в 2000 раз менее, нежели тогда, когда ее возвышение составляло 66° 11′; то же самое должно быть, следовательно, справедливо и для солнца. Это отношение, однако, должно претерпевать весьма большие изменения, происходящие, несомненно, оттого, что нижние части атмосферы почти всегда неравномерно насыщены парами, оказывающими различные влияния, сильнее всего сказывающиеся на свет восходящих и заходящих светил. По этой же причине мы видим также, что астрономические рефракции, обычно одни и те же для больших возвышений, страдают сильным непостоянством для светил, возвышения которых невелики.

ГЛАВА X

Использование предыдущих наблюдений для определения прозрачности некоторой толщи воздуха

Одно из главных применений последних наблюдений состоит, как можно полагать, в том, что они позволяют нам достигнуть достаточно подробных знаний касательно прозрачности воздуха. Г-н де Меран уже опубликовал в Мемуарах Академии Наук за 1721 г. весьма ценную статью, в которой он пишет, что если предположить, что силы света небесного светила могут быть измерены при двух различных возвышениях, то существует возможность определить, какова прозрачность или непрозрачность атмосферы. Этот ученый не указал никакого способа измерения света; более того, он сомневался в самой возможности такового; кроме того, надлежало еще открыть истинный закон, которому следуют ослабления света, когда последний проходит бóльшие или меньшие толщи одной и той же среды,— закон, в ту пору недостаточно исследованный. Я начал с некоторых наблюдений над светом, получаемым нами от луны; исследуя этот вопрос с большею тщательностью, я изобрел способ успешно разрешить эту задачу, Я изложу здесь, прежде

всего, идею этого решения, сохраняя за собою право вернуться к подробностям этого вопроса в дальнейшем.[47]

Наши опыты показывают, что когда светило имеет возвышение в 19° 16′, то свет его составляет лишь две трети света, посылаемого светилом при возвышении в 66° 11′. Эта разница в силе проистекает лишь оттого, что свет должен пройти в атмосфере значительно меньший путь, когда светило стоит высоко, нежели тогда, когда оно близко к горизонту. Правда, и в первом случае свет проходит достаточно большой путь и должен встречать на этом пути большое число частей воздуха, способных задержать его; однако во втором случае он проходит путь гораздо более значительный, и эта величина, на которую второй путь длиннее первого, и есть причина того, что свет оказывается более слабым.

Необходимо, следовательно, найти два различных количества воздуха, которые должны пронизывать лучи небесного светила при двух возвышениях — в 66° 11′ и 19° 16′. Это нетрудно сделать, ибо мы располагаем рядом систем, представляющих с необходимой точностью различные сгущенности и разреженности воздуха. Предположив, что количества воздуха, проходимые лучами, равноценны толщинам в 4275 туаз и 11 744 туаз обычного приземного воздуха,* мы должны заключить, что свет теряет около трети своей силы или уменьшается в отношении 2500 к 1681, проходя пространство, равноценное 7469 туаз нашего воздуха.[48] Действительно, свет должен получать равные ослабления, проходя равные толщи на том и на другом пути; другими словами, он должен быть в точности одинаковым после прохождения первого пути и после прохождения 4275 первых туаз второго. Таким образом, все уменьшение, наблюдаемое при приближении светила к горизонту, обусловлено лишь 7469 последними туазами второго пути или его избытком над первым путем.

* См. таблицу масс воздуха, помещенную в конце этого труда, книга третья, раздел V, стр. 270.

Если бы было совершенно достоверно, что когда небесное светило восходит или заходит, его свет становится в 2000 раз слабее, нежели свет того же светила при возвышении в 66° 11′, то возможно было бы определить тем же способом степень прозрачности другой толщи воздуха; достаточно было бы производить новые наблюдения, чтобы получать значения прозрачности любых других толщин. Гораздо лучше, однако, исследовать общим образом, как мы это сделаем в дальнейшем, в какой мере свет уменьшается, проходя различные толщи прозрачного тела. Такое соотношение может быть найдено без особенного труда; избавившись с помощью этой теории, приложимой ко всем средам, от необходимости непрестанно производить новые опыты, мы сможем удовольствоваться одним единственным опытом, точность которого не вызывает сомнений, и вывести из него все следствия и получить все необходимые нам сведения. Таким образом, достаточно знать, например, что свет уменьшается в отношении 5 к 4, проходя толщу морской воды в 10 футов, или что он уменьшается в отношении 2500 к 1681, проходя 7469 туаз приземного воздуха, дабы иметь возможность найти, насколько он уменьшается, пронизывая все прочие толщи этих сред.

ГЛАВА XI

Наблюдения, сделанные для определения того, насколько свет солнца сильнее света полной луны

Повторив большую часть предыдуших наблюдений, я захотел узнать, во сколько раз солнце освещает нас сильнее луны. Согласно нашему методу, следовало сравнить свет этих двух светил со светом свечи или светильника, служащим мерою сравнения; однако, поскольку свет солнца чрезвычайно силен, его надлежало подвергнуть весьма большим ослаблениям, причем степени этих ослаблений должны были быть всегда известными. Я воспользовался для этой цели вогнутым очковым

стеклом, делавшим лучи сильно расходящимися; мне достаточно было удалиться от него на большее или меньшее расстояние, дабы изменить силу света в желаемой степени. Я проделал один из этих опытов 22 сентября 1725 г. в день полнолуния. Закрыв все окна в комнате, я впустил свет солнца, имевшего возвышение в 31°, сквозь отверстие диаметром в одну линию, перед которым я поставил свое вогнутое стекло. Принимая затем свет на расстоянии от 5 до 6 футов в точке, в которой расхождение лучей составляло 108 линий, и где, следовательно, свет был ослаблен в 11 664 раза, поскольку он занимал пространство диаметром уже не в одну линию, а в 108 линий, то есть в 11 664 раза большее, я оценил его равным в точности свету свечи, расположенной на расстоянии в 16 дюймов.[49] После этого мне оставалось лишь проделать в течение ночи подобное же наблюдение над луною, причем необходимо было попрежнему пользоваться тем же вогнутым стеклом, дабы недостаток его прозрачности причинял в одном из наблюдений уменьшение, подобное тому, которое он причинял в другом. Я дождался времени, когда луна имела возвышение в 31°, однако, хотя я воспринимал ее свет весьма близко от стекла и расхождение лучей составляло лишь 8 линий, свет этот был уже столь слабым, что я был вынужден поместить свечу на расстояние в 50 футов, дабы сделать оба света равными.[50]

Подводя теперь итог этим двум наблюдениям, достаточно принять во внимание, что свет луны был ослаблен вогнутым стеклом лишь в 64 раза, а если бы ослабить его, подобно свету солнца, в 11 664 раза, то свечу следовало бы поместить на расстояние не в 50 футов, а в 675 футов. Поскольку же свет солнца, уменьшенный в 11 664 раза, равен, как мы установили из первого наблюдения, свету свечи, находящейся на расстоянии 16 дюймов, а свет луны, уменьшенный в то же количество раз, равен лишь свету той же свечи, отнесенной на 675 футов или 8100 дюймов, как это следует из второго наблюдения, то отсюда вытекает, что свет солнца относится к свету луны, как 65 610 000 (то есть квадрат 8100) к 256

(то есть к квадрату 16). Таким образом, мы видим, что солнце освещает нас приблизительно в 256 289 раз сильнее, нежели луна.

Я привел здесь лишь третий из сделанных мною опытов; наблюдая полную луну в июле 1725 г., я нашел, что солнце освещает нас в 284 089 раза сильнее, нежели луна; наблюдения в августе дали мне числа 331 776 и при другом опыте 302 500. Я полагаю, что из всего этого можно заключить, что солнце освещает нас приблизительно в 300 000 раз сильнее, нежели луна. Но получение подобного соотношения сопряжено с большими трудностями и поэтому я не решаюсь признать его точным.[51] Не мешает попутно заметить, что когда я делал свои наблюдения, луна находилась приблизительно на своих средних расстояниях от земли. Различия в расстояниях до солнца не должны оказывать существенного влияния на отношения обоих светов, ибо солнце не может удалиться от земли, не удалившись в то же самое время от луны приблизительно во столько же раз; отсюда следует, что если его прямой свет испытывает уменьшение, то его отраженный свет, приходящий к нам от луны, должен уменьшаться в той же мере. Что же касается различия расстояний до луны, то оно должно сказываться существенным образом, ибо эта планета является по отношению к нам словно светильником, пламя которого имеет неизменную силу, но свет коего меняется по мере того, как его воспринимают с существенно различных расстояний. Разница может составлять приблизительно одну четверть, поскольку наибольшее и наименьшее расстояния от нас до луны находятся примерно в отношении 8 к 7, а квадраты этих двух чисел относятся друг к другу примерно как 4 к 3.

Как бы то ни было, эти наблюдения согласуются, насколько это возможно, с тем, что уже было известно ранее о силе света луны. Было установлено, что этот свет, будучи собран в фокусе самых больших вогнутых зеркал, не вызывал никакого ощутимого тепла и не оказывал действия даже на чрезвычайно чувствительный термометр г-на Амонтона.

Г-н де ля Гир младший осветил вогнутое зеркало Обсерватории, имеющее в диаметре 35 дюймов, лучами полной луны, когда последняя проходила меридиан в октябре 1705 г., и собрал ее лучи на участке, меньшем в 306 раз. Сила света луны увеличивалась при этом лишь в 306 раз; если бы, однако, можно было бы достигнуть с помощью более совершенных зеркал, изготовленных впоследствии искусными наблюдателями, увеличение света луны в 1000 раз, что, впрочем, еще не было сделано, то этот свет все еще был бы чрезвычайно далек от равенства со светом, приходящим к нам от солнца. Этот свет все еще составлял бы лишь одну 300-ю часть последнего, и было бы нисколько не удивительно, что мы не почувствовали бы от него никакой теплоты. Что же касается света солнца, то он должен иметь исключительную силу, ибо мы находим его на земле в 300 000 раз более сильным, нежели свет луны, хотя мы и удалены от солнца на расстояние в 400 раз большее, что уменьшает его свет в 160 000 раз.

ГЛАВА XII

Наблюдения, сделанные с целью определить, насколько сильнее светят части солнца, близкие к его середине, сравнительно с теми, которые расположены у краев этого светила

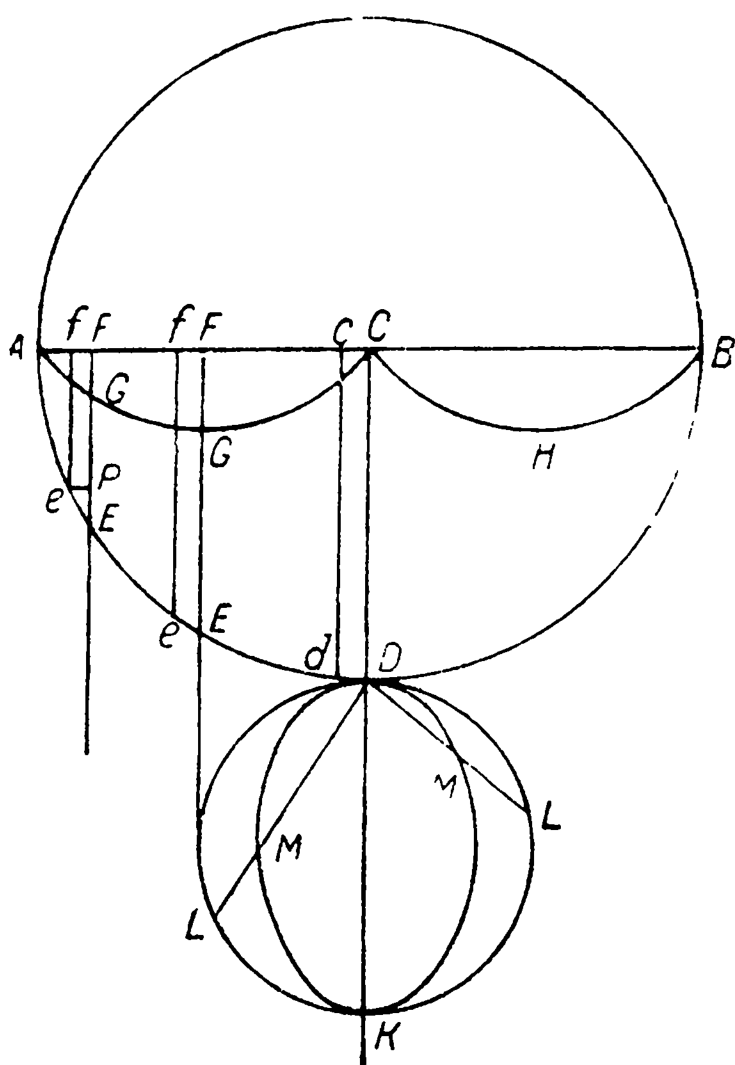
Я закончу этот второй раздел, изложив некоторые попытки, сделанные мною, дабы узнать, испускают ли все части поверхности солнца в точности одинаковый свет. Рассматривая это светило через длинную зрительную трубу, сильно увеличивающую предметы, следует крайне напрягать внимание, дабы заметить некоторую разницу в интенсивности его света. Мы видим как бы плоскую поверхность, яркость которой повсюду кажется одинаковой. То же самое, однако, может случиться, когда мы сравниваем между собой участки неба, значительно удаленные от солнца; при этом свет, посылаемый различными частями атмосферы, представляется нам одинако-

вым, ибо изменения при переходе от одного участка к другому происходят постепенно или через неуловимые ступени; если же каким-либо способом добиться сближения этих участков, как бы изъяв все промежуточное пространство, которое их разделяет, то можно сразу же заметить значительную разницу в их светах. Не следует ли воспользоваться подобным же средством, дабы решить, является ли солнце одинаково ярким по всей своей поверхности, если наблюдать его через длинную трубу?

Для решения этой задачи я воспользовался гелиометром, о котором я говорил в главе VII предыдущего раздела. Оба объектива прибора давали мне два соприкасавшиеся изображения солнца; они имели одинаковую интенсивность света, ибо оба стекла были совершенно одинаковы и имели равные отверстия. Поверхность одного из них была разделена на двенадцать частей, и мне пришлось закрыть $3\frac{1}{4}$ части объектива или изменить поверхности их обоих в отношении 12 к $8\frac{3}{4}$ или 48 к 35, дабы середина второго изображения казалось мне столь же яркой, что и участок той же величины первого, взятый на трех четвертях диаметра.[52] Таким образом, свет солнца не одинаков по всей поверхности диска: если сравнить центр его с участком, удаленным от середины на три четверти радиуса, то количества лучей будут находиться в отношении 48 к 35.

Это наблюдение имеет свои трудности: главная из них заключается в необходимости точно установить участки диска, яркости которых сравниваются между собою. Необходимо, чтобы одна из этих точек была значительно удалена от центра, дабы сделать разницу в их светах большею; с другой стороны, весьма неудобно выбирать эту точку слишком близкою к краю. Я наблюдал ее на расстоянии 41° 25′ от края;[53] хотя я и проверял свое наблюдение три или четыре раза, мне следовало бы, признаюсь чистосердечно, повторить его большее число раз. Несомненно все же, что в участках диска, более удаленных от середины, солнце является менее светя-

щим. Отсюда следует, что каждая отдельно взятая на поверхности солнца точка не излучает во всех направлениях вокруг себя одинаковое количество света, испуская меньшее в более наклоненных направлениях. Если рассматривать точки все более близкие к краям, то это уменьщение превосходит даже уменьшение, претерпеваемое синусами углов, образованных поверхностью светила и исходящими из него лучами.



Фиг. 13.

Действительно, если бы каждая светящая точка испускала, безразлично от направления, одинаковое количество света, то яркость диска неизменно возрастала бы по мере удаления от середины его, и он обрамлялся бы окружностью, имеющей бесконечную яркость. Изобразим солнце в виде сферы *ADB* (фиг. 13) и предположим, что наблюдатель расположен бесконечно далеко на продолжении радиуса *CD*. Он будет получать лучи, выходящие перпендикулярно солнцу, лишь из одной точки, а все другие точки *E* будут освещать его лишь лучами, выходящими наклонно. Следует также заметить, что наблюдатель отнесет все части *Dd*, *Ee* и т. д. сферической поверхности к соответствующим частям *Cc*, *Ff* и т. д. плоскости *AB*, перпендикулярной зрительным лучам, и что эти последние части должны быть равными между собою, дабы первые части также казались равными или отвечали равным участкам на сетчатке. В этом случае части *Dd*, *Ee* и т. д. являются тем большими, чем больше наклон, под которым они видны; они возрастают при приближении к краю диска в той же мере, в коей убывают синусы *EF*. Они, стало быть, заключают большее число светящих точек, и

диск неизбежно имел бы бесконечную яркость у краев, если бы каждая светящая точка посылала во всех направлениях одно и то же количество света, ибо самые последние части *Ee* бесконечно больше средней части *Dd*.

Эта гипотеза слишком противоречит наблюдениям, чтобы ее можно было сохранить, и поэтому необходимо заключить, что каждая светящая точка испускает тем меньше света, чем меньше углы, образуемые выходящими лучами с поверхностью солнца.

Допустим на мгновение, что количества света выражаются синусами этих углов, то есть количество света, получаемого нами из точки *D*, выражается полным синусом *DC*, а получаемого нами из точки *E* выражается синусом *EF*.[82] Тогда диск будет повсюду одинаково ярким, ибо, если какая-либо часть *Ee* является вследствие своего наклона большею и содержит по этой причине большее число светящих точек, то, с другой стороны, каждая из них посылает нам ровно в том же отношении менее света. Таким образом, согласно этой второй гипотезе, которая может оказаться при некоторых обстоятельствах правильной, все части *Ee*, имеющие равные кажущиеся величины, должны посылать нам равные количества света, и вся поверхность светила должна казаться нам одинаково яркой.

Однако, как мы видели, части солнечного диска, наиболее удаленные от середины, оказываются менее светящими, нежели остальные; мы убедились в этом для точки *E*, которая, находясь на трех четвертях радиуса *CA*, удалена от кажущегося края диска *A* на 41° 25′. Затруднительно указать точно интервал, заключенный между обеими сравниваемыми точками, что сказывается на отношении между обоими светами. Можно, однако, не сомневаться, что ослабление, о котором идет речь, существует в действительности.

Таким образом, не подлежит сомнению, что свет, посылаемый наклонно каждой отдельной точкой солнца, уменьшается еще быстрее, чем синусы углов, образуемых выходящими лучами, с поверхностью солнца, и что вместо того, чтобы вы-

ражать количества света, посылаемого нам каждою точкою D, E, и т. д., синусами CD, EF, и т. д., следует брать величины, уменьшающиеся более резко, а именно линии DC, EG, и т. д., заключенные между окружностью круга и некоторою кривою $AGCHB$. Эта кривая линия, которая может стать известною лишь из множества наблюдений, имеет непременно две ветви, которые, образуя угол возврата в точке C, кончаются в A и в B. Кроме того, нам известно, хотя и не столь достоверно, что если выражать свет, испускаемый точкою D в перпендикулярном направлении, через полный синус, то свет, выходящий наклонно из точки E, расположенной на расстоянии 41° 25′ от видимого края диска, выражается не синусом EF, а линией EG, меньшею приблизительно в отношении 48 к 35; таким образом, GF равно, приблизительно, четверти EF, тогда как AF равно, приблизительно, четверти радиуса AC.

Пусть теперь нужно отмечать не количества света, приходящие к нам из различных точек, а различные количества света, испускаемого одною и тою же точкою во всевозможных направлениях. Если бы они были как раз пропорциональны синусам углов, образуемых выходящими лучами, с поверхностью светящего тела, то, взяв точку D, достаточно было бы провести круг DLK, диаметром которого служит DK, то есть продолжение CD, и провести хорды DK, DL и т. д.; последние будут выражать отношение, которому следуют количества света, испускаемые в каждом из направлений DK, DL и т. д. Однако свет, испускаемый наклонно, является еще более слабым; так, для направления DL, составляющего с поверхностью светящего тела угол в 41° 25′, он выражается величиною DM, на одну четверть меньшею, нежели DL. Число лучей, испускаемых по всевозможным направлениям, выражается, следовательно, не хордами DK, DL круга DKL, а хордами некоторого овала $DMKM$, суженного по сравнению с кругом приблизительно на одну четвертую часть.[54]

КНИГА ВТОРАЯ

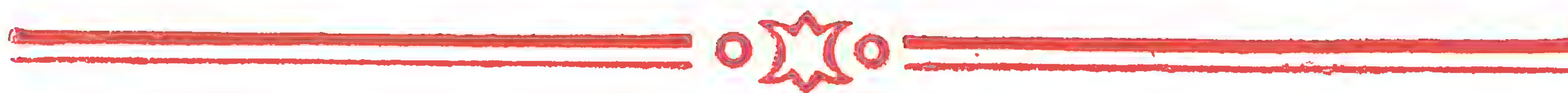


ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВА СВЕТА, КОТОРОЕ ОТРАЖАЕТСЯ ПОВЕРХНОСТЯМИ КАК ГЛАДКИМИ, ТАК И ШЕРОХОВАТЫМИ





В этой второй книге мы намереваемся изложить более подробно наши наблюдения над отражением, производимым зеркалами и другими поверхностями. Мы будем неизменно принимать, что эти отражения происходят от совершенно гладких математических поверхностей, не гасящих и не ослабляющих ни одного луча, и начнем с нескольких замечаний о свойствах, коими должны обладать в этом отношении указанные поверхности. Хотя речь будет итти о вещах чрезвычайно простых, мы считаем совершенно необходимым обратить на них внимание, ибо это устранит те сами по себе незначительные трудности, перед которыми, однако, остановились величайшие физики и математики, трактовавшие об оптике.



РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ЗАМЕЧАНИЯ ОБ ОТРАЖЕНИИ, ПРОИЗВОДИМОМ БЕСКОНЕЧНО ГЛАДКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ, НЕ ГАСЯЩИМИ НИ ОДНОГО ЛУЧА

ГЛАВА I

О мнимом отражательном фокусе плоских поверхностей и об интенсивности отражаемого ими света

Как известно нашим читателям и уже подчеркивалось нами ранее, свет, отражаясь от совершенно плоской поверхности, приобретает в точности то же направление, как если бы светящее тело находилось позади поверхности на том же расстоянии, на каком оно в действительности находится перед нею. Лучи, исходящие из светящего тела P на фиг. 6, отразившись от зеркала B, приобретают направление BD, как если бы они исходили из мнимого фокуса p; однако особенностью плоского зеркала и основной мыслью настоящего замечания является то, что точка p ничуть не меняет своего положения, когда отражение происходит в точке, отличной от точки B, или когда глаз помещается в место, отличное от D. Быть может, будет излишним добавлять, что свет имеет ту же интенсивность в начале отраженного луча B, что и в конце прямого луча, ибо отражение не приносит никаких изменений.[55] Если обозначить через $\frac{1}{PB^2}$ силу света в том месте, где он падает на пло-

скость, то, поскольку эта сила следует закону обратных квадратов расстояний, мы получим для силы света в точке D значение $\frac{1}{pD^2}$ или $\frac{1}{(PB+BD)^2}$.[56]

ГЛАВА II

Об отражательном фокусе кривых линий

Иное происходит в случае кривых поверхностей: кажущееся местоположение изображения перемещается при изменении точки, в которой происходит падение. Для вящей простоты мы ограничимся случаем окружности. Если лучи LD и Ld, выходя из светящего тела L (фиг. 14), падают на окружность AIB в двух бесконечно близких точках D и d и отражаются вдоль линий DM и dm, то продолжения этих лучей пересекутся в G и лучи будут казаться исходящими из этой точки, которая тем самым явится кажущимся местоположением изображения светящей точки L. Если затем поместить глаз в иное место, то кажущееся местоположение G также сместится, оставаясь все время на кривой OGI, известной геометрам под названием *отражательной каустики*. Эта кривая образована последовательным пересечением отраженных лучей; все они являются ее касательными. Наши читатели знают также, что для того чтобы найти отрезок DG, точка G которого лежит внутри круга на продолжении этих лучей, достаточно составить следующую пропорцию: $DL+\frac{1}{4}DF$, сумма длины падающего луча LD и четверти хорды DF, являющейся продолжением отраженного луча DM, относится к четверти этой хорды, как длина падающего луча LD к DG. Короче говоря, мы имеем все время[57]

$$DG=\frac{\frac{1}{4}DF\times LD}{LD+\frac{1}{4}DF}.$$



Фиг. 14.

ГЛАВА III

О двойных мнимых отражательных фокусах кривых поверхностей

Следует, однако, отметить одно обстоятельство, которое, повидимому, не привлекало к себе достаточного внимания. Оно заключается в том, что поверхности выпуклых или вогнутых зеркал никогда нельзя безусловно рассматривать как

простые кривые линии; эти поверхности в действительности всегда имеют две каустики и создают два различных изображения. Это обстоятельство тем более существенно, что эти два изображения обладают иногда свойствами, позволяющими воспринимать их одинаково отчетливо. Указанные изображения не имеют ничего общего с двумя изображениями, даваемыми нашими обычными зеркалами, которые отражают двумя своими поверхностями — стекла и ртути. Поверхности, о которых мы здесь говорим, кривые, но абсолютно простые.

Рассмотрим же вместо круга AIB совершенную сферу. Всегда будет справедливо следующее: бесконечно близкие друг к другу лучи, падающие в точки D и d, будут отражаться так, как если бы они исходили из точки G; столь же справедливым будет и то, что бесконечно близкие лучи, падающие вбок от D, например в точку δ, будут достигать глаза так, как если бы они исходили не из точки G, а из точки E, в которой отраженные лучи пересекают ось BA сферы, проходящую через светящее тело. Действительно, падающий луч $L\delta$ и отраженный луч $\delta\mu$ лежат в плоскости, отличной от плоскости, заключающей в себе лучи LD и DM; эти две плоскости пересекаются вдоль CL. Надлежит, стало быть, различать два мнимые фокуса отраженных лучей, возникающие в зависимости от того, падают ли лучи сверху или снизу от D, или же они падают сбоку.

Если бы отверстие нашего зрачка являло собой чрезвычайно узкую вертикальную щель, подобную той, которую мы наблюдаем у некоторых животных, то мы воспринимали бы лишь те лучи, мнимым фокусом которых служит точка G, т. е. те, которые кажутся нам исходящими из нее; мы бы их воспринимали, ибо они образуют в совокупности как бы плоское лезвие MGm, расположенное в вертикальной плоскости. Если, напротив, наш зрачок являл бы собою горизонтальную щель, мы воспринимали бы лишь лучи, которые кажутся исходящими из точки E и образуют собою горизонтальную плоскость $ME\mu$. Поскольку, однако, свет проникает в наш глаз через совершенно круглое отверстие, оба изображения должны действовать на нашу сет-

чатку одновременно. Если несмотря на это мы видим почти всегда лишь одно изображение, то это объясняется, главным образом, тем, что наши глаза не способны обнаружить с одинаковой четкостью мельчайшие предметы на различных расстояниях и что лишь одно из этих изображений находится на расстоянии, подходящем нашему зрению.

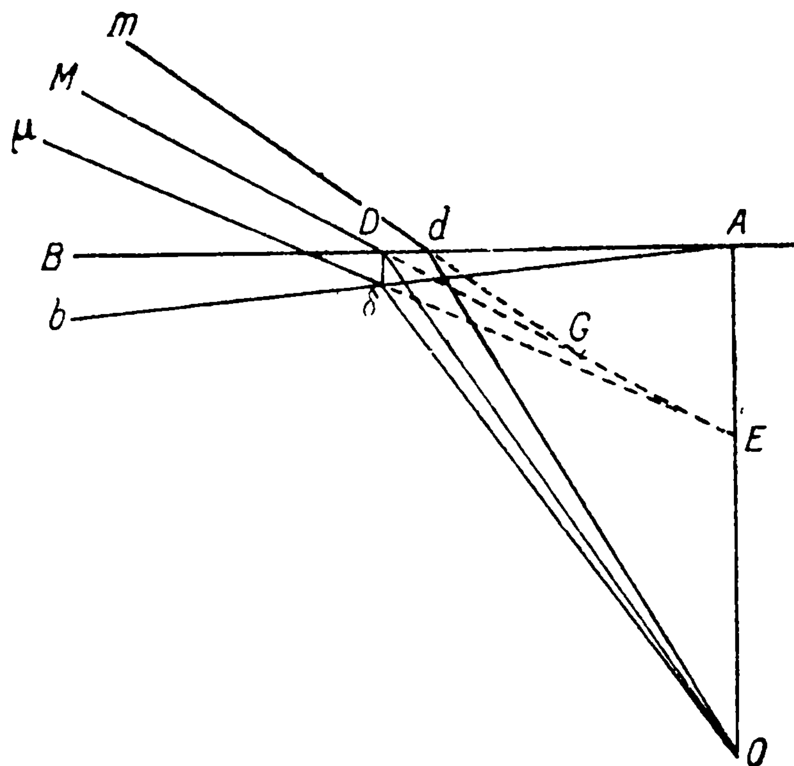
Наши глаза должны выбирать здесь лишь между двумя изображениями, однако они достаточно искусны, чтобы распознать искомое изображение среди гораздо большего числа таковых. При наблюдении звезд с помощью длинной зрительной трубы могут образоваться семь различных изображений, как бы нанизанных на ось трубы и расположенных на различных расстояниях от объектива, как то вытекает из различной преломляемости семи основных цветов. Красное изображение расположено ближе всего к наблюдателю; оранжевое немного далее; желтое еще дальше, и т. д. Если строение атмосферы остается одним и тем же и если изменение возвышения звезды незначительно, то мы видим всегда одно и то же изображение, а именно то, которое находится на благоприятном нашему глазу расстоянии и цвет которого, к тому же, более всего способствует созданию впечатления на нашей сетчатке. Если же воздух наполнится внезапно парами или если наблюдение звезды ведется при двух весьма разнящихся возвышениях, вследствие чего некоторые лучи ослабляются более других, то можно, как я это впервые обнаружил в Перу, найти второе изображение, что приведет порою к заметным ошибкам, превосходящим, быть может, 20 секунд в определении положения наблюдаемой звезды.*

Это замечание существенно потому, что оно указывает нам на трудности, препятствующие доведению точности определения прямого восхождения звезд до пределов, достигнутых в определении склонения. Не подлежит сомнению, что вследствие пренебрежения этим изменением фокуса зрительных труб многие из большого числа наблюдений, которыми мы располагаем,

* См.: „Книга об определении фигуры Земли по наблюдениям в Перу“.

не имеют той точности, каковую им в настоящее время приписывают. Для того чтобы совершенно избегнуть этого источника ошибок, надлежит принять меры предосторожности, быть может, не достаточно хорошо известные; однако мы не можем входить здесь в подробности их изложения.

Предмет, погруженный попросту в воду, являет нам частный пример двоения изображения. Если *BAb* (фиг. 15) представляет собою часть поверхности воды, а предмет находится в *O*, то мы можем воспринимать его изображение в двух местах: либо в *G* на каустике преломления, либо в *E* на вертикальной прямой *AO*, проходящей через предмет и являющейся в той же мере каустикой, что и первая линия. Мы видим первое изображение благодаря таким лучам, как, например, *ODM*, *Odm*, которые, направляясь



Фиг. 15.

к нам, располагаются одни выше, а другие ниже. С другой стороны, второе изображение, то, которое представляется нам находящимся в *E*, образовано лучами *ODM*, *Oδμ*, расположенными друг около друга.[58] Мы воспринимаем то или другое изображение, и весьма вероятно, что из них обоих в глазу образуется единая картина, представляющая собою их общую часть, тогда как части, не перекрывающиеся взаимно, приносят лишь вред, делая зрение менее отчетливым. В этом заключается разгадка трудного вопроса, которым усердно занимались Таке, Барроу, Смит и многие другие авторы;[59] сам г-н Ньютон считал эту проблему весьма головоломной, почти неразрешимой.*

* См. Поучение в Предложении VIII „Лекций по оптике“ г-на Ньютона.[60]

ГЛАВА IV

О силе света, отраженного бесконечно гладкой выпуклой сферической поверхностью

Только что приведенные рассуждения имеют близкое касательство к нашему предмету, однако мы обратимся к обстоятельствам, связанным с ним еще теснее. Как мы уже видели, необходимо отличать два разных рода плоскостей лучей в пучке, отражаемом каждою частью сферы на фиг. 14. Эти плоскости принимают вид весьма узких вееров, ширина которых лежит в вертикальном или горизонтальном направлениях, смотря по тому, исходят ли они из точки G или из точки E. Равным образом очевидно, что уменьшение света в каждой плоскости следует не закону квадратов расстояний от мнимого фокуса, а закону простых расстояний, поскольку ширина веера возрастает просто как расстояние.

Особенно необходимо, однако, отметить то, что множество плоскостей лучей, выходящих из одного фокуса, выражается числом лучей, которые содержатся в плоскостях, исходящих из другого фокуса. Таким образом, для того чтобы получить полное число лучей, надо перемножить числа лучей, содержащихся в вертикальной и горизонтальной плоскостях.[61] Иными словами, пучок лучей расширяется по мере удаления от сферы, и если его толщина выражается углом MGm, образуемым лучами, расположенными один поверх другого, то ширина его выражается углом $ME\mu$, образуемым лучами, идущими друг около друга. Вся совокупность лучей занимает, следовательно, все большее пространство, протяженность которого зависит в равной степени от расстояний до обоих мнимых фокусов G и E; отсюда выходит, что, умножая эти расстояния одно на другое, мы получим обратное соотношение, в котором свет уменьшается по мере своего распространения. Таким образом, свет ослабляется в данном случае не обратно пропорционально квадратам одного из расстояний, а обратно пропорционально произведению MG на ME.[62]

В непосредственной близости от сферы сила отраженного света в точности равна силе падающего света. Последняя тем меньше, чем больше квадрат расстояния до светящей точки L, и ее можно выразить через $\frac{1}{LD^2}$. Это же выражение пригодно для только что отразившегося света, поскольку лучи образуют с поверхностью сферы одинаковые углы при падении и при отражении и поскольку ничто не меняет здесь ширины пучка. Однако по мере того, как свет удаляется от отражающей его поверхности, он распределяется по пространствам μm, которые, как мы видели, тем более, чем дальше они удалены от мнимых фокусов E и G, и свет будет, следовательно, ослабляться в том же отношении.

Стало быть, для того чтобы найти его силу или интенсивность в точке M, всегда достаточно образовать следующую пропорцию: произведение расстояний ME и MG относится к произведению DE и DG, как интенсивность света, пришедшего в D, к его интенсивности или силе в точке M.[63] Если в качестве интенсивности падающего света вблизи точки D взять $\frac{1}{LD^2}$, то мы получим для силы отраженного света, воспринимаемого перпендикулярно в точке M, выражение

$$\frac{DE \times DG}{LD^2 \times ME \times MG}.$$

ГЛАВА V

Свет, отраженный от всех частей сферы, в точности одинаков по силе, если воспринимать его на очень большом расстоянии и если светящая точка также весьма удалена от сферы

Всякий раз, когда светящая точка L весьма сильно удалена от сферы, расстояние DG от мнимого фокуса G до точки D, в которой происходит отражение, становится в точности равным

четверти хорды DF, ибо в выражении $\dfrac{\frac{1}{4}DF \times LD}{LD + \frac{1}{4}DF}$, определяющем это расстояние DG, член LD в знаменателе становится бесконечно большим по сравнению с другим членом, который исчезает, и выражение сводится к $\frac{1}{4}DF$. Это имеет место всякий раз, когда падающие лучи приходят из такой дали, что их можно считать параллельными друг другу. В этом случае всегда достаточно брать четверть DG хорды DF, являющейся продолжением отраженного луча, и эта точка будет мнимым фокусом лучей, падающих на Dd. Что касается другого фокуса, то при сколь угодно большом или малом удалении светящего тела он не покидает линии CL; он находится всегда в точности на пересечении отраженного луча и диаметра, параллельного падающим лучам, а именно в точке E.

Можно сделать еще одно, столь же важное замечание. Когда светящая точка бесконечно удалена, произведение DE на DG, являющееся одним из членов пропорции, которой мы пользовались для нахождения силы отраженного света, всегда постоянно и ровно в четыре раза менее квадрата радиуса сферы. Действительно, поскольку лучи LD параллельны CA, угол DCA, равный углу LDK, равен также углу KDM и углу CDE.[64] Следовательно, треугольник CED является равнобедренным и подобным треугольнику FCD, и произведение DE на DF будет, следовательно, неизменно равно квадрату радиуса CD. Произведение DE на DG будет, следовательно, неизменно равно четвертой части или квадрату половины радиуса.[65] Но если постоянно это произведение, то и произведение ME на MG, если считать, что отраженный свет воспринимается всегда на равных и достаточно больших расстояниях, дабы можно было пренебрегать диаметром сферы по сравнению с ними, также постоянно.

Отсюда следует, что сила света претерпевает при отражении от сферы равное ослабление во все стороны, если только

сделать два предположения, а именно, что светящее тело бесконечно удалено и что отраженный свет воспринимается как бы с бесконечно большого, но всегда одинакового расстояния. Прямой свет, падая на сферу, имеет повсюду одинаковую интенсивность, ибо все лучи предполагаются параллельными и удаленность всех точек сферы от светящего тела принимается как бы одинаковой. Сверх того, этот свет претерпевает затем равное уменьшение во всех направлениях, ибо он ослабляется в отношении произведений $MG \times ME$ и $G \times DE$, которые при этом постоянны. Отсюда явствует справедливость той любопытной и новой теоремы, которая принесет нам в дальнейшем немалую пользу и которая гласит, что *когда светящее тело бесконечно удалено и освещает сферу, имеющую бесконечно гладкую и совсем не поглощающую свет поверхность, то эта сфера отражает во все стороны свет одинаковой силы, коль скоро он воспринимается с очень далекого расстояния*. Следует лишь исключить то место, куда падает тень сферы; впрочем, по сравнению со всею огромною сферическою поверхностью, воспринимающей отраженный свет, эта тень является лишь точкой.

Мы останавливаемся на этом свойстве, дабы достигнуть большей ясности. Весь отраженный свет, равномерно распределенный по столь большим пространствам, доставляется лишь половиною сферы. Если бы свет мог доставляться всею сферою, то отношение двух светов выражалось бы обратным отношением поверхностей или отношением квадратов радиусов. Отраженный свет был бы тем слабее, чем больше квадраты расстояний, с которых он приходит, и тем сильнее, чем более квадрат радиуса сферы. Однако прямой свет воспринимается и отражается лишь половиною сферы, причем следует заметить, что количество прямого света выражается не величиною поверхности сферы по причине наклонности почти всех, так сказать, покатых частей поверхности, а лишь величиною площади одного из ее больших кругов, составляющей одну четверть поверхности всей сферы. Это, в сущности, свет, выражаемый четвертью

поверхности шара и распространяющийся вдаль по целой сферической поверхности. Отсюда вытекает, что уменьшение света не должно следовать уменьшению квадратов радиусов, а должно отвечать одному из этих квадратов и четверти другого. В этом состоит как бы физическое объяснение части теоремы, которую мы доказали геометрически.[66]

ГЛАВА VI

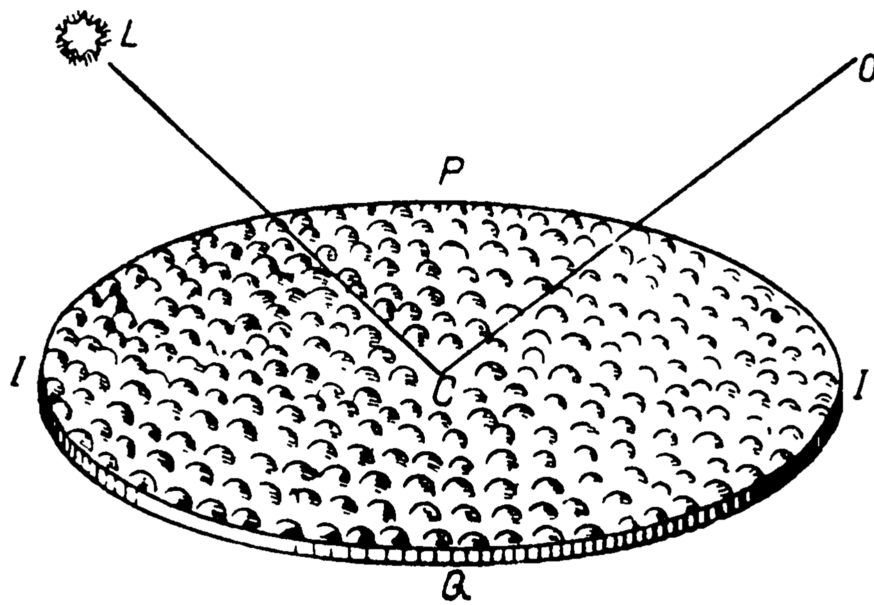
О количестве света, отражаемого поверхностями, шероховатости и неровности которых заменяются маленькими, совершенно гладкими полусферами[67]

Зная силу света, отражаемого сферами с бесконечно гладкими поверхностями, нетрудно видеть, каковы будут явления, даваемые поверхностями, покрытыми бесконечным числом маленьких полусферических выступов, собственные поверхности которых являются, однако, совершенно гладкими. Если вместо освещенной половины сферы на фиг. 14 рассматривать плоскость, равную основанию полусферы или плоскости одного из ее больших кругов, и считать ее целиком покрытой маленькими полусферами произвольного размера, то эта плоскость, отражая свет во все стороны, будет распространять всегда в точности то же количество лучей, что и сфера, если только воспринимать их с одного и того же, очень большого удаления и если светящее тело находится также чрезвычайно далеко.

Фиг. 16 изображает этот плоский круг, целиком покрытый малыми полусферами большего и меньшего размера, заменяющими неровности и шероховатости. Его диаметр равен по величине оси сферы, и мы предполагаем, что, умножая число расположенных на плоскости полусфер и меняя их размеры, мы добиваемся совершенного заполнения ими плоскости. Если эти условия выполнены, то оба света, отражаемые в любом направлении, будут одинаково сильны, вследствие того, что множественность полусфер совершенно восполнит малость их

величины. Правда, каждая маленькая полусфера будет распространять тем менее света, чем менее ее размеры, и число лучей, исходящих из нее, будет пропорционально квадрату половины ее радиуса; однако, с другой стороны, число полусфер будет в точности во столько же раз бо́льшим.

Если диаметр каждой маленькой полусферы на плоскости (фиг. 16) в 1000 раз менее диаметра сферы на фиг. 14, то каждая маленькая полусфера будет отражать в любом направлении свет в 1 000 000 раз более слабый, чем свет, отражаемый сферою. Однако именно потому, что диаметр маленькой полусферы в 1000 раз менее диаметра сферы, на фиг. 16 будет находиться 1 000 000 полусфер, восстанавливающих общую силу света и делающих ее равной силе света от сферы. Это восполнение будет при всех иных соотношениях столь же точным. Таким образом, очевидно, что *свет, отраженный в определенном направлении, будет всегда одним и тем же, независимо от того, отражается ли он весьма большим числом маленьких полусфер или меньшим числом больших полусфер, или, наконец, одной единственной полусферой* (как на фиг. 14), *если только эти полусферы имеют в совокупности одинаковое основание, то есть покрывают одну и ту же плоскость* *PIQI* (фиг. 16).



Фиг. 16.

Для того чтобы эта теорема была справедлива, необходимо, однако, чтобы при косых отражениях эти маленькие полусферы не мешали бы друг другу, так чтобы свет, посылаемый одними, не перехватывался бы другими, иначе маленькие полусферы не будут равносильны половине сферы на фиг. 14. Чтобы это условие было выполнено, можно поло-

жить, что полусферы имеют различные величины, подобранные надлежащим образом. Следовало бы наложить еще несколько ограничений, однако мы считаем себя вправе опустить их, избежав тем самым большей части затруднений физического рода, которые могли бы возникнуть; наше исследование этого предмета будет отвлеченным, хотя и найдет в дальнейшем некоторые практические приложения.

Если желают сравнить интенсивность света, отраженного поверхностью $IPIQ$ (фиг. 16), покрытой всеми этими маленькими полусферами, с интенсивностью света, отраженного этою же самою поверхностью, когда она совершенно гладка, то это сравнение оказывается совсем простым в том случае, когда диаметр поверхности достаточно мал по сравнению с расстоянием от светящего тела и с расстоянием, на котором воспринимают отраженный свет. Читатель помнит, что если выразить интенсивность света, достигающего точки C, через $\frac{1}{LC^2}$, то в точке O, после отражения от математической плоскости, она будет составлять $\frac{1}{(LC+CO)^2}$. Что касается до той же поверхности, покрытой маленькими полусферами, то мы будем всегда мысленно заменять их одною единственною полусферою. Величина $\frac{1}{LC^2}$ будет попрежнему выражать интенсивность света на расстоянии LC от светящего тела, и нам остается лишь уменьшить ее в том же отношении, в котором квадрат половины радиуса воображаемой большой полусферы меньше квадрата CO; другими словами, интенсивность света в O будет $\frac{\frac{1}{4}\times IC^2}{LC^2\times CO^2}$. Таким образом, количества света, отраженного от совершенно гладкой поверхности, и света, отраженного от плоскости, покрытой маленькими полусферами, будут относиться как $\frac{1}{(LC+CO)^2}$ $\frac{\frac{1}{4}\times IC^2}{LC^2\times CO^2}$.

Кроме того, читатель, несомненно, заметит, что математическая поверхность отражает свет лишь в определенную область пространства, оставляя все остальное в тени, не содержащей ни одного луча, и что при увеличении размеров этой плоскости интенсивность света возрастать не будет. Напротив, плоскость, покрытая маленькими полусферами, освещает равномерно все вокруг себя, и если увеличить ее размеры, то свет, посылаемый ею, действительно увеличивается, ибо каждая из частей плоскости вносит свою долю в отражение света в данном направлении. Это же самое можно усмотреть из общих выражений обоих членов соотношения.

Значительно труднее будет найти силу света, отраженного поверхностью, покрытой маленькими полусферами, если диаметр этой поверхности велик по сравнению с расстояниями CL и CO. Можно разделить эту поверхность с помощью прямоугольной координатной сетки; каждая часть будет представлять маленький прямоугольник, равный маленькому кругу, диаметр которого надлежит найти. Этот маленький круг может служить основанием полусферы, которая сама по себе равноценна всем другим меньшим полусферам, содержащимся в малом элементарном прямоугольнике. Стало быть, найдя расстояние от каждого из этих маленьких прямоугольников до светящего тела и взяв единицу, деленную на квадраты этих расстояний в качестве выражения интенсивности света, доходящего до маленького прямоугольника, остается лишь уменьшить ее в том же отношении, в котором квадрат расстояния до точки O более квадрата половины радиуса маленького круга, равного маленькому элементарному прямоугольнику, и мы найдем вызываемое им действие. Наконец, поскольку это действие будет само по себе элементом света, отраженного в направлении к O, и будет бесконечно малой величиной второго порядка, то для того чтобы получить полную силу света, останется лишь проинтегрировать его дважды, что сможет быть выполнено с помощью квадратур круга и гиперболы.[68]

Вернемся, однако, к предположению, что поверхность $IPIQ$ достаточно мала, и сделаем замечание, которое может ока-

заться немаловажным, хотя оно и содержит много общего с уже сказанным ранее. Если в этом частном случае количество света, отраженного в том или ином направлении, в точности равно количеству света, отражаемого сферой, изображенной на фиг. 14, то видимая картина будет тем не менее существенно различной в зависимости от того, будем ли мы смотреть непосредственно на сферу или на плоскость, покрытую маленькими полусферами. Очевидно, что на сфере мы увидим лишь небольшой светящий участок, являющийся изображением светящего тела L, тогда как плоскость на фиг. 16 будет казаться нам целиком освещенной вследствие действия, оказываемого каждой маленькой полусферой, и мы увидим свет распределенным равномерно по всей ее поверхности, если покрывающие ее полусферы достаточно малы, чтобы не позволить нам различать отдельные маленькие светящие точки каждой из них.

Другое отличие плоскости состоит в том, что хотя общее количество ее света будет всегда одним и тем же, изменение угла, под которым она рассматривается глазом, приведет к тому, что она будет восприниматься иною; плоскость покажется более или менее суженною, будет занимать больший или меньший участок сетчатки, и изображение, образуемое все время одним и тем же числом лучей, будет приобретать в глазу бóльшую или меньшую яркость. Интенсивность света, увеличиваясь в той же мере, в какой сокращаются размеры изображения, будет возрастать в том же отношении, в каком убывает синус угла между зрительными лучами и плоскостью.

ГЛАВА VII

О свете, отражаемом сферою, поверхность которой покрыта бесконечным числом маленьких, совершенно гладких полусфер

Предположим теперь, что бесконечным множеством маленьких полусфер покрыта не плоскость, изображенная на фиг. 16, а сама поверхность сферы на фиг. 14. Число маленьких

полусфер, покрывающих половину сферы, равно, как известно, удвоенному числу сфер, необходимому для покрытия плоскости на фиг. 14. Таким образом, в итоге действия каждой маленькой полусферы свет, отражаемый сферой и воспринимаемый в направлении светящего тела, будет иметь величину в точности удвоенную по сравнению с прежней. Сила света может быть определена из следующей пропорции: *квадрат расстояния, на котором воспринимается отраженный свет, относится к половине квадрата радиуса сферы, как сила прямого света, падающего на сферу, к силе отраженного света.* Если вместо того, чтобы воспринимать этот последний свет в направлении светящего тела, мы наблюдаем его в каком-либо ином направлении, то он неизбежно будет меньшим, ибо мы будем освещены меньшим количеством маленьких полусфер. Если мы, например, выберем свое местоположение на направлении, составляющем прямой угол с CL, то мы получим половину того света, который мы получили бы, находясь в непосредственной близости от направления CL.

ГЛАВА VIII

О свете, отражаемом нам планетами и, в частности, Луною, согласно двум, сделанным выше, гипотезам, а именно: 1) поверхности их совершенно гладки; 2) они покрыты бесконечным множеством маленьких, совершенно гладких полусфер

Первая гипотеза, будучи применена к небесным телам, отражающим нам свет Солнца, противоречит всем наблюдениям. Если бы поверхности этих тел были бы абсолютно гладкими, то диски их казались бы нам совершенно темными, за исключением одной точки, которая была бы изображением Солнца. Кроме того, это изображение, видимое на планете, давало бы нам всегда одно и то же количество света. Луна, находясь в своей четверти или даже вблизи соединения, освещала бы нас так же, как и при противостоянии.[69]

Этот свет, хотя он и казался бы нам исходящим лишь из одной точки планеты, был бы все же очень сильным.

Нам известны отношения диаметров планет к их расстояниям до Земли. Этого достаточно, чтобы с помощью пропорции, найденной в предыдущей главе, определить, насколько свет, который они посылали бы нам, если бы их поверхности были совершенно гладкими, был бы слабее света, получаемого ими самими от Солнца. Из указанной пропорции следует, что это отношение будет составлять в случае Луны единицу, отнесенную примерно к 190 800.[70] Правда, поскольку мы находимся несколько ближе к Солнцу, чем Луна при своем противостоянии, свет, получаемый нами от первого из этих двух светил, несколько превосходит свет, получаемый Луною; разница, впрочем, не превышает одной двухсотой части. Таким образом, свет, отраженный поверхностью малой планеты, если считать ее совершенно гладкою, был бы еще несколько меньшим по сравнению со светом, приходящим к нам непосредственно от Солнца; он составлял бы одну 191 700-ю или 191 800-ю часть.

Перейдем, однако, ко второй гипотезе. Предположим, что поверхность планеты целиком покрыта маленькими шероховатостями или выпуклостями, абсолютно равноценными маленьким полусферам, поверхности которых совершенно гладки; предположим также, что эти маленькие полусферы отражают свет столь хорошо, что ни один луч не оказывается поглощенным. Каждая маленькая полусфера создает крошечное изображение Солнца. Тогда вся часть планеты, представляющаяся нашему взору и освещенная Солнцем, будет казаться светящейся. При этом Луна и все другие планеты должны будут казаться нам такими, каковы они в действительности. Полная Луна будет освещать нас в два раза сильнее, нежели в положении одной четверти; ее свет будет всегда в точности пропорциональным не кажущейся величине ее фаз, а действительной величине обращенной к нам освещенной части.

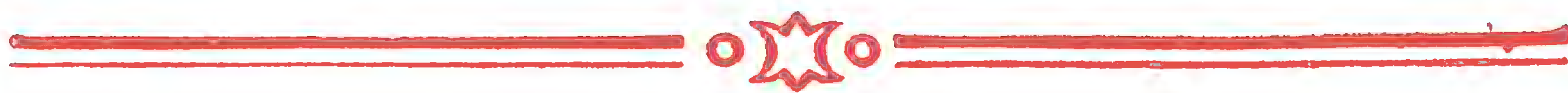
Другая весьма примечательная особенность заключается в том, что, при прочих равных условиях, края диска планеты

будут казаться нам более яркими, нежели части, расположенные ближе к центру, ибо части краев, которые нам кажутся равновеликими, в действительности имеют бо́льшую величину и содержат бо́льшее число шероховатостей и выпуклостей; последние, будучи непосредственно обращены к нам частью своей малой поверхности, пошлют нам каждая одинаковое количество света. Именно это мы и наблюдаем в действительности у первичных и вторичных планет в собственном смысле. Свет, испускаемый их краями, сильнее света, испускаемого серединой, и этим они существенно отличаются от Солнца, свет которого, как мы наблюдали, становится меньшим, когда мы рассматриваем точки диска, более удаленные от центра.

Наконец, если продолжать следовать второй гипотезе, то свет Луны в ее противостояниях должен быть, как мы видели, в два раза более сильным, чем в том случае, когда поверхность планеты является совершенно сферической без какой-либо шероховатости. Таким образом, вместо того, чтобы посылать нам свет, составляющий одну 191 700-ю или 191 800-ю часть света, получаемого от Солнца, она посылала бы нам одну 95 900-ю часть света. Между тем непосредственное наблюдение, описанное в конце предыдущей книги, дало нам в три раза меньшее значение, ибо мы нашли, что свет Луны составляет лишь одну 300 000-ю часть света Солнца. Однако может статься, что шероховатости, или выпуклости, которыми покрыта Луна, не равноценны маленьким полусферам; кроме того, очевидно, что эти неровности или части поверхности планеты не обладают одной и той же способностью отражать свет и что некоторые из них поглощают весьма значительное его количество.[71]

Действительно, мы видим на Луне пятна в пять или шесть раз более темные, чем другие ее участки или отражающие сообразно своему размеру в пять или шесть раз менее света. Я нашел 4 марта 1758 г. в 4 часа утра это соотношение между темным пятном Гримальди и серединой Mare humorum.[72] Правда, пятно Гримальди, казавшееся мне всегда

более темным, чем все другие пятна, занимает на диске планеты лишь небольшой участок; однако остальные темные части обладают значительно большею протяженностью, и неудивительно, что они все вместе вызывают уменьшение света примерно на две трети общего количества; в этом нет ничего нового по сравнению с тем, что мы наблюдаем в случае земных тел, из которых одни отражают более двух третей получаемых ими лучей, иные просто половину, а иные несравненно менее того. Мы не преминем вновь вернуться к этому вопросу и не будет терять надежды, по крайней мере в отношении земных тел, более доступных нашим опытам, преуспеть в определении того, вызвано ли ослабление отражаемого ими света по преимуществу погашением лучей, или же оно проистекает оттого, что маленькие выпуклости или шероховатости не равноценны маленьким полусферам.



РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ИЗЫСКАНИЯ О КОЛИЧЕСТВЕ СВЕТА, ОТРАЖАЕМОГО ФИЗИЧЕСКИМИ ТЕЛАМИ С ПОЛИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

ГЛАВА I

О том, что при отражении часть света всегда оказывается как бы потушенною

Сомнительно, чтобы в природе существовало какое-нибудь тело, которое отражало бы весь падающий на него свет и не поглощало бы значительной его части. Если тело имеет цвет, то оно отражает преимущественно лучи того же цвета, устраняя почти все остальные лучи. Впрочем, даже в том случае, когда тело освещено лишь лучами того же цвета, что и цвет тела, последнее должно всегда гасить часть этих лучей. Оно нагревается более или менее заметно, если падающий свет достаточно силен, и было бы трудно понять, каким образом оно может приобрести эту теплоту, если только не считать, что некоторое число лучей отдает ему часть своей силы, проникая в него на бо́льшую или меньшую глубину и сообщая маленьким малекулам, из которых оно образовано, особого рода возбуждение. Это возбуждение, или сотрясение, есть не что иное, как сообщенное им движение, которое неизбежно должно отвечать некоторой потере движения в самом свете. Как бы то ни было, сила или число лучей неизбежно должно уменьшаться.

Действительно, хотя поверхности ртути и зеркал, которым придают отличную полировку, и создают весьма сильное отражение, эти поверхности все же не отражают всего падающего на них света. Заставляя проникать в камеру-обскуру, изображенную на фиг. 9 (стр. 35), дневной свет, который я брал с возвышения в $11\frac{1}{2}^\circ$, и который падал на поверхность ртути, я должен был придать двум отверстиям P и Q отношение 6400 к 4826, дабы сделать этот свет равным прямому свету. Таким образом, из 1000 лучей под углом падения в $11\frac{1}{2}^\circ$ ртуть отражает 754.* В другой раз я был вынужден придать отверстиям отношение 6400 к 4497, что привело к результату несколько отличному от предыдущего: из 1000 лучей, падавших на поверхность ртути, было лишь 703 отраженных. Приблизительно то же самое получилось у меня в опытах с металлическими зеркалами. Из этих опытов следует, что при отражении теряется по меньшей мере четверть света и что, повидимому, не существует тела, гасящего или поглощающего меньшую часть света.

ГЛАВА II

О том, что число отраженных лучей не находится в постоянном отношении к числу падающих лучей при различных наклонах

Еще большее отличие физических поверхностей, о которых идет речь, от математических поверхностей, рассмотренных в предыдущем разделе, состоит в том, что в действительности отражение не является одинаково ярким при всех углах падения. Обычно оно сильнее при малых углах и слабее при больших. Различие очень велико, когда лучи падают с различным наклоном на весьма прозрачные тела, однако оно почти столь

* В дальнейшем мы всегда будем брать в качестве угла падения лучей угол, образуемый ими с поверхностью, а не с перпендикуляро к ней.

же велико и в случае некоторых непрозрачных тел, и я никогда не замечал, чтобы оно исчезало полностью. Наибольшее неравенство я получил для черного мрамора. Я исследовал производимое им отражение, воспользовавшись различными способами, отвечающими фигурам 3, 4 и 6, которые я разъяснил в главах III и IV первого раздела предыдущей книги. Я был сначала удивлен, увидев, что при угле падения в 3° 35′ этот кусок мрамора, несмотря на свое весьма посредственное качество, давал отражение, приближавшееся к тому, которое дает ртуть; из 1000 лучей, падавших на него, он отражал 600. Однако при угле падения в 15° он отражал лишь 156 лучей из 1000; при угле в 30° — лишь 51 и при угле в 80° — лишь 23. При расположении, подобном изображенному на фиг. 3, и при расстоянии *DE* между дощечками *D* и *E*, равном 600 частям, я вынужден был поместить свечу на расстоянии от первой дощечки, равном всего лишь 79 частям.

Подобные же опыты с металлическими зеркалами давали мне значительно меньшие различия, составлявшие, самое большее, одну восьмую или одну девятую часть, но всегда в ту же сторону. Что касается отражения от ртути, то я мог наблюдать его непосредственно лишь с помощью камеры-обскуры, в которую я впускал дневной свет, причем расположение моего жилища позволяло мне получать свет лишь на определенной высоте.

Для угла падения в 21° я нашел, что из 1000 лучей имелось один раз 637 отраженных, а другой раз 666. После этого я сравнил отражения, производимые под всеми другими углами, с отражениями от металлических зеркал. Я помещал ртуть и зеркало друг возле друга позади экрана *GH* в камере-обскуре, изображенной на фиг. 9, и пользовался вторым из способов, которые я разъяснил в главе V первого раздела предыдущей книги. Мне показалось, что ртуть превосходит металлическое зеркало главным образом в случае малых углов падения; при больших же углах падения разница весьма незначительна и едва уловима.

Я упомянул выше о трудностях, встретившихся в опытах, которые я производил с металлическими зеркалами; еще большие трудности я испытал при наблюдениях, произведенных с ртутью. Желая получить полное удовлетворение и рассеять все свои сомнения, я производил наблюдение неоднократно и с величайшею тщательностью; однако я заметил, что с течением времени отражение почти всегда становилось более слабым. Помещение, в котором я производил наблюдения, было темным и плотно закрытым, в нем было тепло, и я заметил, наконец, что мгновенное ослабление отражения проистекает от легкости, с которою ртуть тускнеет от простого соприкосновения с воздухом, являвшимся, быть может, несколько влажным. Кроме того, несмотря на все предосторожности, которые можно принять, в помещении всегда летают незаметные пушинки, которые, осаждаясь на поверхности жидкости, не могут проникнуть в нее, по причине малости их удельного веса. Эти маленькие плавающие тела далеко отбрасывают свои тени и всякий раз, когда углы падения очень малы, преграждают путь многим из отражающихся лучей. Этого не происходит в такой мере, когда опыты производятся с другими жидкостями: они менее тяжелы, и маленькие пушинки погружаются в них почти полностью.

В опытах, произведенных с ртутью, имеется еще один источник ошибок, выявляющийся в том случае, когда сосуд, содержащий ртуть, не обладает достаточною величиною. Известно, что поверхность этой жидкости не является совершенно плоскою, в особенности, если площадь ее невелика; она является выпуклою, и эта выпуклость должна уменьшать интенсивность отраженного света, ибо лучи, которым надлежало быть после отражения параллельными, становятся расходящимися. Дабы избежать этого неудобства, пользуются сосудом большего размера, однако при этом иногда возникает как раз противоположная, быть может непредвиденная, помеха: выпуклость жидкости сменяется вогнутостью. Это получается в случае круглого сосуда, диаметром приблизительно лишь в двадцать линий.

Когда сосуд полон, края ртути образуют обращенную вовне выпуклость. Частицы жидкости на этих краях находятся на грани падения, от которого их удерживает взаимное сцепление; они оказываются сцепленными друг с другом повсюду, вплоть до середины поверхности, словно образуя цепь, которая их удерживает. Не очевидно ли, однако, что последние части должны несколько поддаваться под действием усилия, оказываемого ими для удержания первых частей, влекомых тяжестью и стремящихся вылиться из сосуда? Внутренние части, следовательно, несколько приближаются к краям, составляя у середины поверхности в некотором роде пустоту или легкую вогнутость. Я наблюдал ее в действительности.

Дабы понять с большею ясностью это явление, на котором мы останавливаемся вследствие его своеобразия, можно вообразить себе ряд капель ртути, которые, находясь на горизонтальной плоскости и соприкасаясь друг с другом своими боками, образуют круговой венчик с пустою серединою. Если подлить на различные участки венчика новой ртути, то ширина его изменится и пустое место в середине окажется несколько суженным. Совершенно ясно, что если продолжать подливать ртуть, то капли смогут в конце концов войти в соприкосновение друг с другом у середины, заполнив пустоту; при этом, однако, ртуть будет вначале иметь посредине меньшую высоту, нежели у краев. Отсюда следует, что необходимо брать сосуды значительно большей ширины, например диаметром в 4 или 5 дюймов. Это единственный способ получать совершенно плоские поверхности, если только не допускать, как я это предполагаю, возможности образования нескольких концентрических венчиков, высота которых уменьшается по мере удаления их от краев или приближения к середине. Размеры этих своего рода круговых стоячих волн, равно как и их число, если их, действительно, имеется несколько, должны зависеть от ширины сосудов и от отношения между удельным весом жидкости и сцеплением ее частиц.

Несмотря на то, что наблюдения отражения, производимого жидкостями, затруднительны по самому существу, вследствие неизменной горизонтальности их поверхности, я, тем не менее, усиленно изучал отражения, производимые водою, пользуясь для этой цели водою из Аркейля.[73] Я полагал, что вода может служить постоянною мерою сравнения и что результаты, полученные с нею, будут особенно надежными благодаря тому, что различия, получаемые с разными образцами чистой воды, несомненно менее, нежели различия, получаемые у поверхностей других тел в зависимости от частных свойств тел, коим они принадлежат, а также, нередко, и от совершенства их полировки.

ГЛАВА III

О различной силе отражения, производимого поверхностью воды при различных углах падения света

Я применил к изучению отражения, производимого поверхностью аркейльской воды, почти все способы, придуманные мною для измерения света. Во многих случаях я пользовался дневным светом, который я впускал через два различные отверстия в камере-обскуре; я сравнивал также отраженный свет со светом, посылавшимся под тем же углом металлическими зеркалами или поверхностью треугольной стеклянной призмы, после чего мне оставалось исследовать в отдельном опыте это последнее отражение. Определив этими или иными способами количества света, отражаемые водою, и уже зная количества, отражаемые ртутью, я неоднократно производил заключительную поверку, сравнивая эти два отражения непосредственно друг с другом.

Когда я заставлял падать дневной свет на поверхность воды в камере-обскуре при угле падения в $13\frac{1}{2}$, мне приходилось придавать двум отверстиям, от которых я получал прямой и отраженный свет, отношение, равное 11 644 к 54756, дабы сделать оба света равными. Стало быть, из

1000 лучей, падавших на поверхность воды, возвращалось лишь 213 или, согласно другому наблюдению, лишь 244. Я не удовольствовался введением в камеру-обскуру света под одним единственным углом; впрочем, я считаю излишним входить в слишком большие подробности. Прибавлю только, что при угле падения в 25° и размере отверстия, доставлявшего отраженный свет, выражавшемся неизменною величиною 54756, мне пришлось придать другому отверстию величину, равную 5274; это показывает, что в этом случае из 1000 лучей отражалось лишь 97.

Из этих наблюдений видно, насколько сильные уменьшения претерпевает свет при отражении от воды, когда углы падения велики или когда лучи образуют большой угол с поверхностью, отсылающей их обратно (мы неизменно продолжаем отсчитывать наклоны или углы падения от поверхности, а не от перпендикуляра к ней). Разность эта оказывается еще много большею, если сравнивать самые малые наклоны с наклонами, близкими к прямому углу. Я порою бывал в нерешимости по поводу того, не является ли отражение от поверхности воды при очень малых углах падения более сильным, нежели отражение от поверхности ртути. Приняв во внимание все обстоятельства, можно полагать его несколько менее сильным, хотя мне кажется очень затруднительным оценить точно величину этого различия. Окончательно можно сказать, что при самых малых наклонах свет, отражаемый водою, очень близок к трем четвертям прямого света.

Каждый, кому доводилось прогуливаться по берегу пруда в ясную и тихую погоду, испытывал, находясь против солнца, действие этого сильного отражения. Отраженный свет иногда составляет треть, половину или даже еще бо́льшую часть света, получаемого от солнца, и эта добавка воспринимается весьма заметным образом. По мере приближения солнца к горизонту, прямой свет постепенно уменьшается по закону, который мы попытаемся указать в дальнейшем, в то время как отражение становится при этом все более ярким. Поэтому существует определенное возвышение светила, при котором полная теплота или соединенное действие обоих светов достигает наибольшей

возможной силы. Это составляет предмет задачи, для которой достаточно будет полностью указать основы ее решения, после чего для получения ответа останется лишь произвести некоторые вычисления. Возвышение солнца, дающее этот максимум, равно 12 или 13°.

Если мы, напротив, рассмотрим отражение, производимое водою при больших углах падения, то мы найдем его чрезвычайно слабым. Я убедился в том, что в случае почти перпендикулярного падения отраженный свет составляет разве одну тридцадь седьмую часть света, отраженного ртутью, и из всех моих наблюдений следует, что он составляет при этом лишь одну шестидесятую или, скорее, одну пятьдесят пятую часть прямого света. При угле падения в 50° свет, отражаемый поверхностью воды, составляет, приблизительно, одну тридцать вторую часть света, отражаемого ртутью, и, поскольку эта доля возрастает при уменьшении угла, он оказывается уже в два раза более сильным при угле падения в 39°, ибо при этом он составляет одну шестнадцатую часть света, отражаемого ртутью.

ГЛАВА IV

Построение таблицы, указывающей количества света, отражаемого водою при всевозможных наклонах лучей

Было бы тщетно желать построить таблицу количества лучей, отражаемых водою при различных углах падения, основываясь на одних только наблюдениях. Понадобилось бы чрезвычайно умножить число опытов, пришлось бы всегда ограничиваться взятием средних из различных результатов, и, несмотря на это, числа таблицы плохо согласовывались бы друг с другом и показывали бы слишком большой разброс. Целесообразнее поэтому исходить из некоторого числа избранных наблюдений и выводить из них все остальные числа таблицы способом, который приводит к наилучшему возможному согласию со всеми другими опытами. Выразив количество прямого

света единицею, я принял для отраженного света общее выражение $A + Bz^3 + Cz^6$, в котором z означает косинус-верзус угла падения или избыток единицы, принимаемой за полный синус, над прямым синусом угла падения, и мне понадобилось сделать лишь три наблюдения, дабы определить коэффициенты A, B и C.[74]

Угол падения в 90° дает $z = 0$, и первый член A должен тогда означать (поскольку остальные члены исчезают) количество отраженных лучей. Это количество, как мы видели, составляет одну пятьдесят пятую часть прямого света, что дает для величины A дробь $\frac{1}{55}$. Затем я связал два других члена, во-первых, с наблюдениями, сделанными при угле падения в 25°, которые показали мне, что из 1000 лучей отражаются лишь 97,

Таблица количеств света, отражаемого поверхностью воды

Углы падения (в градусах)	Число отраженных лучей	Углы падения (в градусах)	Число отраженных лучей	Углы падения (в градусах)	Число отраженных лучей
$\frac{1}{2}$	721	10	333	40	34
1	692	$12\frac{1}{2}$	271	50	22
$1\frac{1}{2}$	669	15	211	60	19
2	639	$17\frac{1}{2}$	178	70	18
$2\frac{1}{2}$	614	20	145	80	18
5	501	25	97	90	18
$7\frac{1}{2}$	409	30	65		

1000 означает число прямых лучей.

и, во-вторых, с наблюдениями, из которых я узнал, что при угле падения, так сказать, бесконечно малом, отраженный свет составляет три четверти падающего или прямого света. Наше общее выражение переходит в выражение

$$\frac{1}{55} + \frac{1}{3}z^3 + \frac{2}{5}z^6,$$

показывающее, следовательно, силу отраженного света для всех углов падения сравнительно с прямым светом, принимаемым всегда за единицу. Эта формула очень проста и состоит из немногих членов; она, тем не менее, достаточно точно согласуется со всеми теми моими наблюдениями, коим я более всего доверяю.[75]

ГЛАВА V

Построение таблицы количества света, отражаемого стеклом, из которого изготовляют зеркала

Я применил этот же способ к стеклу, из которого изготовляют зеркала и стекла наших очков; я нашел, что отражение от стекла следует иному закону, нежели от воды, а также, что существуют очень большие различия в отражении от разных кусков стекла, происходящие, без сомнения, от неодинаковой степени полированности последних, а, может быть, также, или даже в большей степени, от различия веществ, входящих в их состав. Обычно, по крайней мере при больших углах падения, сильное отражение обязано, повидимому, в значительной степени непрозрачности тех или иных сред. Многие куски стекла отражают при перпендикулярном падении одну сороковую часть прямого света, а для многих других кусков эта величина оказалась равною одной тридцать первой. Как бы то ни было, если попрежнему выражать прямой свет единицею, то формула

$$\frac{1}{40} + \frac{7}{10}z^3 - \frac{1}{40}z^6$$

будет достаточно хорошо выражать закон, которому следует

отражение от этих поверхностей при всевозможных наклонах. Единица выражает попрежнему полный синус, а z есть, как и ранее, косинус-верзус угла падения.

Таблица отражений, производимых стеклами

Углы падения (в градусах)	Число отраженных лучей	Углы падения (в градусах)	Число отраженных лучей
$2\frac{1}{2}$	584	30	112
5	543	40	57
$7\frac{1}{2}$	474	50	34
10	412	60	27
$12\frac{1}{2}$	356	70	25
15	299	80	25
20	222	90	25
25	157		

1000 означает число прямых лучей.

ГЛАВА VI

О сравнении светов, отражаемых поверхностями воды и ртути, когда эти две жидкости находятся в одном сосуде

Неодинаковый ход отражений на различных поверхностях порождает многие любопытные явления; мы уделим некоторое внимание одному из них, выбрав его из прочих, ибо оно даст нам повод сделать ряд полезных разъяснений. Этот случай являет аналогию с тем, о чем шла речь в первой книге касательно бассейна, наполненного водою, дно которого оказывается видимым под одним определенным наклоном и про-

падает из виду при другом. Если налить поверх ртути, содержащейся в сосуде, некоторое количество воды, то образуется нечто вроде зеркала, причем вода служит как бы стеклом для него. Мы увидим два изображения: на поверхностях ртути и воды и при малых углах падения эти изображения будут иметь достаточно сходную силу, дабы можно было впасть в ошибку, приняв одно из них за другое.

При больших углах падения изображение, создаваемое поверхностью воды, исчезнет; это произойдет, когда его интенсивность будет меньшею, нежели одна шестидесятая или одна восьмидесятая часть интенсивности других светов, попадающих в глаз, как мы уже заметили в первой книге, и мы будем видеть при этом лишь изображение, создаваемое ртутью. При более низком расположении глаза сила изображения, создаваемого водою, будет увеличиваться, а сила другого, напротив, уменьшаться, ибо чем большее количество света отражается поверхностью воды, тем менее света входит в эту среду, чтобы создать изображение на ртути. Наконец, при еще более низком положении глаза, это последнее изображение станет несравненно более слабым, нежели первое. Таким образом, мы сможем делать любое из них по желанию более сильным и более слабым; разграничивая эти два совершенно различных случая, можно найти, что средний угол падения, который их разделяет, равен приблизительно 10°. Нечто подобное получается с нашими обычными зеркалами; однако пограничный угол падения, при котором то и другое изображения имеют для большинства зеркал одинаковую силу, составляет обычно 13 или 14°. Этот угол не является неизменным вследствие неоднородности зеркал.[76]

При угле падения, дающем в нашем опыте одинаковую степень силы обоим изображениям на воде и на ртути, отражается при первой встрече с водою примерно около трети света, как показывает первая из предыдущих табличек. Из 1000 лучей, исходящих от предмета и встречающих первую поверхность под углом в 10°, приблизительно лишь 333

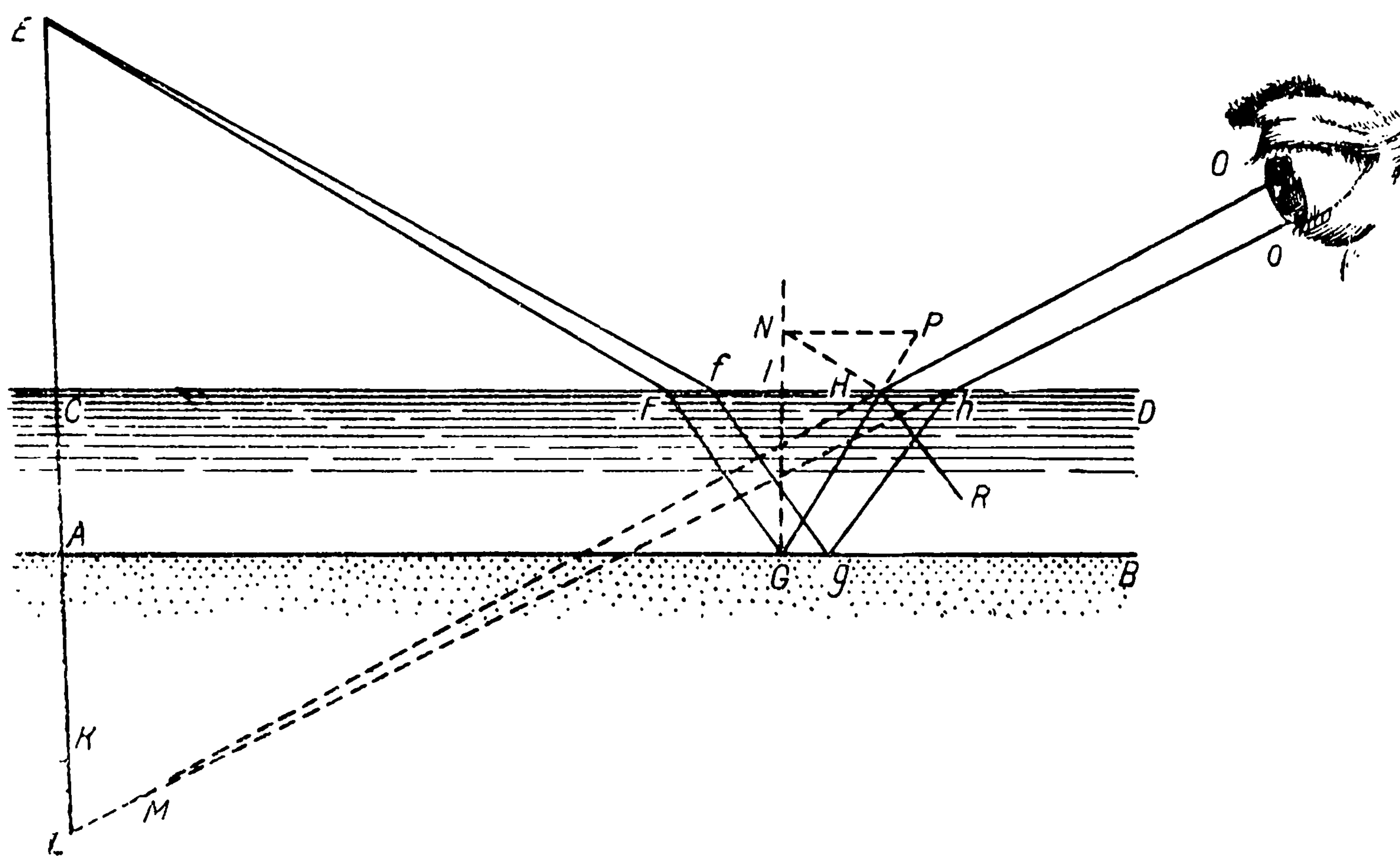
создают верхнее изображение. Следовательно, остается 667 лучей, входящих в воду и падающих на поверхность ртути, создавая на ней второе изображение. На расположенной ниже ртути получается второе отражение, вызывающее новое ослабление; 667 лучей сводятся, примерно, к 500. Можно совершенно не считаться с уменьшением, причиняемым недостатком прозрачности воды, не только на первой части пути лучей, но также и на второй части или на их возвратном пути, если толщина воды составляет лишь несколько линий или несколько дюймов, ибо эта среда столь прозрачна, что при малой ее глубине она не задерживает заметным образом никакого света. Изображение, получаемое на ртути, отсылает нам, следовательно, 500 лучей; однако этот свет, падая на поверхность воды с ее внутренней стороны или снизу, претерпевает новое отражение, возвращающее внутрь воды значительную часть лучей, вследствие чего до нас доходят лишь те лучи, которые не испытали отражения. Эта, возвращаемая внутрь воды часть 500 лучей составляет 160 или 170 лучей. Таким образом, оставшаяся часть лучей, проходящих сквозь поверхность и достигающих нас, сообщает изображению на ртути ту же яркость, что и яркость изображения, видимого нами на поверхности воды и посылающего нам 333 луча.

Все это станет нам еще более ясным, если мы бросим взгляд на фиг. 17, на которой E изображает предмет, AB — поверхность ртути, а CD — поверхность воды. Мы уже видели, что лучи, отраженные этою второю поверхностью, направляются к глазу так, как если бы они исходили из точки K, расположенной ниже CD настолько же, насколько предмет E находится выше CD. Лучи отражаются между F и H в точке, не означенной на чертеже, дабы не загромождать оного; они идут, однако, всегда так, как если бы они исходили из точки K, и эта точка является также мнимым фокусом лучей, как направляющихся в верхнюю и нижнюю части отверстия в радужной оболочке, так и тех, кои падают на правый или левый край оного. Таким образом, отраженные лучи, после падения

8*

под углом в 10°, дают в *O* свет с интенсивностью $\frac{333}{KO^2}$, в то время как сила света, падающего на поверхность воды в *F* и еще не претерпевшего никакого разложения или разделения, равна $\frac{1000}{EF^2}$. Все это представляется достаточно ясным.

Что же касается изображения от отражения в точке *G* на ртути, то его следует рассмотреть несколько подробнее. Лучи



Фиг. 17.

EFGHO, приходящие к глазу, отражаются в *G* и изменяют направление два раза, вследствие преломления в *F* и *H*. Они обладают, кроме того, двумя мнимыми фокусами, смотря по тому, идут ли они бок-о-бок друг с другом, или один поверх другого, как изображено на фиг. 17.[77] Первые лучи кажутся исходящими из точки *L*, то есть точки пересечения продолжения их последнего направления *HO* и вертикали *EL*, опущенной из предмета *E*. В самом деле, ясно, что, поскольку все эти лучи расположены в различных вертикальных плоскостях, общим пересечением которых является вертикаль *EL*, все продолжения их должны также пересекаться вдоль этой же линии, и лучи

должны падать в глаз так, как если бы они исходили из нее в действительности.

Однако другие лучи, например *Efgho*, лежащие несколько выше или несколько ниже один другого, не выходя за пределы одной и той же вертикальной плоскости, имеют мнимый фокус в точке *M*. Читатели, имеющие опыт в нахождении каустик, смогут определить ее положение без труда.[78] Дабы отыскать эту точку весьма простым способом, восставим перпендикуляр *HN* к *GH* и продолжим его до пересечения с вертикалью точки *G*, после чего проведем горизонтальную линию *NP* до пересечения с *GH*. Выражая затем постоянное отношение, в котором находятся синусы при преломлении, литерами m и n, мы можем составить следующую пропорцию: mn относится к $2m^2-2n^2$, как *HP* относится к четвертому члену пропорции $\frac{2m^2-2n^2}{mn}HP$, равному расстоянию между двумя мнимыми фокусами *L* и *M*. Отношение m к n в случае воды весьма близко к $\frac{4}{3}$, и мы получим для расстояния *LM* значение $\frac{7}{6}HP$; таким образом, для того чтобы получить это расстояние, достаточно всегда увеличивать *HP* на одну шестую часть.

Однако поскольку для изображения, получающегося на ртути, имеется два мнимых фокуса, с ним получится то же самое, что и с изображением предмета, погруженного в воду (фиг. 15);[79] интенсивность его света будет зависеть от произведения двух расстояний от глаза до фокусов *L* и *M*, и изображение, которое при этом будет получаться, будет всегда несколько беспорядочным. Строго говоря, то же самое должно иметь место и у всех наших обычных зеркал; изображение, получающееся на поверхности их слоя, будучи почти всегда весьма ярким, не должно, тем не менее, быть столь же ясным, что и изображение, получающееся на первой поверхности стекла. Дело будет обстоять иначе, если мы сделаем толщину воды *IG* очень малою по сравнению с высотою предмета; *HP*, равно как и *LM*, станут близки к нулю, и оба мнимых фокуса *L* и *M*

совпадут с мнимым фокусом K, принадлежащим верхней поверхности воды.

Таким образом, можно видеть, что оба изображения претерпевают изменения в яркости или интенсивности их света лишь вследствие расщепления, происходящего при отражениях. Изображение, создаваемое поверхностью воды, претерпевает лишь одно уменьшение силы, которое сводит последнюю от 1000 до 333 в том частном случае, о котором здесь, главным образом, идет речь, то есть когда угол падения составляет 10°. Изображение же, получающееся на поверхности ртути, претерпевает, повторяем, всегда три последовательных уменьшения вследствие разделения света. Первое из них происходит при отражении в F, где свет, входящий в воду, оказывается уменьшенным до 667. Во-вторых, он претерпевает второе уменьшение в G на поверхности ртути, которая, поглощая часть света, доводит свет, отражаемый в направлении GH до 500. Наконец, в H свет испытывает последнее ослабление за счет части, которая отделяется от него, отражаясь вдоль HR, при встрече света с внутреннею поверхностью воды, и лишь остаток, равный 333, приносит в глаз второе изображение.

ГЛАВА VII

О количестве света, отражаемого при наименьших наклонах внутреннею поверхностью прозрачного тела, когда свет направляется к выходу из него

Нам остается изучить указанное отражение, относящееся попрежнему к полированным поверхностям, но претерпеваемое светом, не входящим в среду, а, напротив, направляющимся к выходу из нее, или падающим на одну из поверхностей тела с ее внутренней стороны. Это отражение связано с весьма примечательными явлениями. Начиная с самых маленьких наклонов и до наклонов, выражаемых некоторым числом гра-

дусов, наибольшая часть лучей претерпевает отражение, и притом, быть может, столь же сильное, что и отражение от металлических зеркал или от поверхности ртути, в то время как другая, не выходящая наружу часть света ослабляется или поглощается, так что поверхность прозрачного тела оказывается непрозрачною с внутренней стороны.[80] Если увеличить наклон или угол падения еще на несколько градусов более определенного предела, то можно заметить, что сильное отражение внезапно прекращается, значительная часть лучей выходит наружу, и число погашенных или ослабленных лучей оказывается небольшим. Наконец, по мере дальнейшего увеличения угла падения, количество отраженного света становится все меньшим и меньшим, и когда угол падения достигает 90°, из прозрачного тела выходят почти все лучи, поскольку его поверхность теряет почти всю способность поглощать лучи, приобретая почти такую же прозрачность, которою она обладает в обратном направлении, то есть когда лучи падают на нее извне.

Первое из этих обстоятельств замечали все наши читатели, которым доводилось пользоваться для целей оптики треугольными стеклянными призмами. Помня об этом свойстве, в катодиоптрических трубах иногда заменяют плоские металлические зеркала этими призмами, пользуясь сильным отражением, даваемым ими при указанных обстоятельствах. Если луч света падает на призму изнутри под углом падения в 10, 20 или 30°, то ее поверхность производит почти в точности то же действие, что и поверхность ртути, погашая, примерно, четверть или треть лучей и отражая две трети или три четверти. Это свойство не меняется заметным образом вплоть до угла падения в 49°49′.* Если, однако, угол падения увеличивается хотя бы на один градус, то количество света, отражаемого вовнутрь, внезапно уменьшается, и весьма значительная часть

* Если брать 31 к 20 для отношения синусов при преломлении лучей со среднею преломляемостью.[81]

лучей выходит наружу, вследствие чего поверхность сразу становится прозрачною.

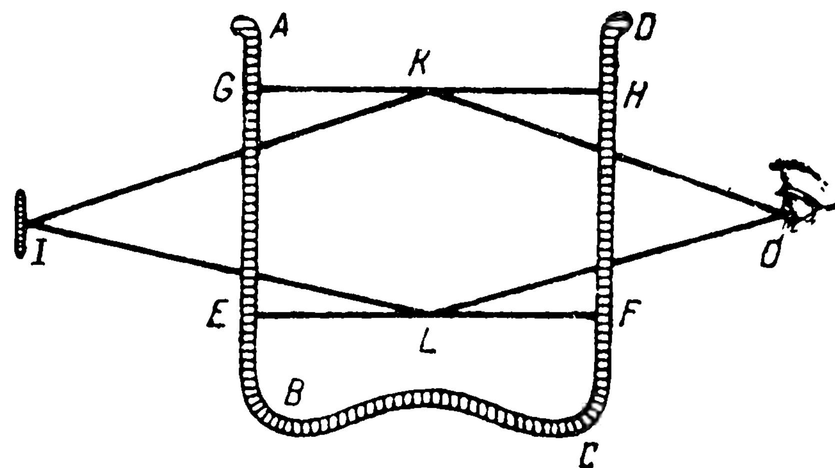
Все прозрачные тела обладают этим свойством, отличаясь друг от друга лишь большею или меньшею величиною угла падения, при котором прекращается сильное отражение, равно как и погашение другой части света, не претерпевающего отражения. Этот угол составляет для воды, примерно, 41°32′, и он столь тесно связан в каждой среде с постоянным отношением, в котором находятся при преломлении синусы, что для объяснения явления, по крайней мере в том, что касается возникающей порою непрозрачности поверхности, этот закон оказывается вполне достаточным и не оставляет желать ничего большего.

Когда лучи, подобные *OD* на фиг. 15, выходят из точки *O* и удаляются из воды, пересекая поверхность *AB*, то они преломляются в *D*, приобретая направление *DM*; если мысленно продолжить преломленный луч до встречи с вертикалью *OA* в точке *E*, то постоянным отношением, характеризующим преломление, окажется отношение между линиями *DO* и *DE*, являющимися секансами углов *ADO* и *ADE*, тогда как *AD* играет роль полного синуса.[82] Это и есть то отношение, открытие которого Гюйгенс приписывает Снеллиусу, и которое, как впервые было опубликовано г-ном Декартом, получается с необходимостью для синусов дополнительных углов.

Это отношение между *DO* и *ED* составляет, примерно, 4 к 3 или, точнее, 529 к 396 для лучей средней преломляемости, выходящих из воды; то же самое получится как в том случае, когда свет исходит из точки *O*, глубже погруженной в воду, так и в том случае, когда эта точка, напротив, расположена выше. Однако во втором случае следует принять во внимание существование конечного предела, ибо если точка *O* лежит слишком высоко, или если угол *ODA* менее 41°32′, или, что то же, если четверть *OD* не превосходит трети линии *DA*, то закон преломления более не

может быть наблюдаем;[83] секанс DE становится, как говорят геометры, мнимым, поскольку необходимо, чтобы он неизменно составлял три четверти OD и чтобы он при этом оказывался меньшим, нежели полный синус DA, что приводит к противоречию. Законы природы столь нерушимы, что преломление более не имеет места: оно сменяется отражением. Свет возвращается вспять, ибо поверхность действует так, как если бы она была полностью лишена прозрачности; в то же время часть света оказывается погашенной. Впрочем, физические истолкования, дававшиеся по нынешнее время преломлению, не простираются на эту вторую особенность.

Если угодно убедиться весьма простым образом в том, что было сказано относительно сильного отражения, производимого внутреннею поверхностью воды при угле падения меньшем $41\frac{1}{2}°$, то достаточно налить ртуть и воду в цилиндрический бокал $ABCD$ из прозрачного стекла (фиг. 18); еще лучше взять сосуд в форме прямоугольного параллелепипеда. EF есть поверхность ртути, а GH — поверхность воды. В точке I на высоте, средней между высотами двух поверхностей EF и GH, помещают вертикальную дощечку, освещая ее свечой, расположенной в точке на той же высоте; если поместить глаз в O, в точности против дощечки I, то можно увидеть, что оба изображения, получающиеся в L — на поверхности ртути и в K — на внутренней поверхности воды, имеют вполне одинаковую силу, коль скоро углы падения достигают $41\frac{1}{2}°$.



Фиг. 18.

Мне казалось, правда, что я заметил, и притом против моего ожидания, что кусок хрусталя, помещенный непосредственно на поверхности ртути, несколько ослабляет силу

отражения; вода же должна, естественно, оказывать то же действие. Однако, поскольку ослабление, причиняемое хрусталем, было едва заметным, мы вправе пренебречь таковым. Не составило бы труда, задавшись целью сделать этот опыт более совершенным, уничтожить расстояние, разделяющее оба изображения, заставив последние совершать второе отражение от двух маленьких зеркал одинакового качества, помещенных снаружи друг подле друга. Рассматривая затем оба изображения одновременно, можно было бы сделать сравнение более надежным.

Если, однако, все различные углы падения, начиная от нуля до $41\frac{1}{2}^\circ$ для воды и до $49^\circ49'$ для хрусталя, дают отражения столь же сильные, что и отражение от ртути, и погашают остальной свет, то достаточно лишь увеличить немного угол падения, дабы отраженный свет оказался значительно уменьшенным, а количество поглощенного света — достаточно малым. Опыт, изображенный на фиг. 17, служит доказательством этому. Если угол падения *EFC* составляет в случае воды 10°, то угол *GFH* равен, примерно, $42^\circ31'$, равно как и угол *GHF*, являющийся углом падения луча *GH* по отношению к внутренней стороне передней поверхности *CD*; однако хотя угол падения оказывается увеличенным всего лишь на один градус, поверхность восстанавливает бо́льшую часть своей прозрачности: из 500 лучей, падающих на нее в направлении *GH*, отражается в направлении *HR* всего лишь 160 или 170, а 333 луча выходят в направлении *HO*. Мы достаточно твердо убеждены в том, что эта последняя часть, выходящая наружу, составляет 333 по отношению к общему количеству 500 лучей, идущих в направлении *GH*. Вполне возможно, однако, что часть света, отражаемого внутрь воды, в направлении *HR*, является несколько меньшею, чем это было указано; это обязательно, если значительная часть лучей претерпевает погашение.

ГЛАВА VIII

О количестве света, отражаемого внутреннею поверхностью при наибольших углах наклона

Теперь мы переходим к исследованию того, что происходит при наибольших углах падения; однако мы будем заниматься лишь стеклами, с которыми, как мы полагаем, можно проделать опыты, приносящие наибольшую пользу. Признаюсь чистосердечно, что эти изыскания потребовали от меня немалого труда, и я затратил на них гораздо более времени, нежели предполагал; трудности, с которыми я при этом встретился, проистекали оттого, что отраженный свет, силу которого я хотел определить, доходит до нас, претерпев различные изменения, и оттого, что на практике не всегда легко распознать в наблюдаемом измененном свете действие отражения, производимого одною внутреннею поверхностью прозрачного тела.

Я полагал, что наблюдения надлежит разнообразить, дабы получить достаточное количество данных и быть в состоянии воспользоваться аналитическим расчетом. Я сравнивал, например, прямой свет предмета: 1) с изображением этого предмета на первой поверхности, 2) с другим предметом, освещенным более или менее сильно, нежели первый, и рассматриваемым сквозь тот же хрусталь, и 3) с получающимся на внутренней поверхности изображением, которое было, однако, сильно измененным, когда я его наблюдал. Расчет был несложным. Задача была из тех, кои считаются простыми. Если обозначить через a силу прямого света, через b — свет, отраженный первою поверхностью хрусталя, через e — силу света после прохождения сквозь это тело, через c — силу внутреннего изображения того, которое наблюдается нами после всех изменений, кои оно претерпело, и через z — искомую силу того же изображения, избавленного от всего постороннего, то мы получим $z = \frac{(a-b)c}{e^2}$.[84]

Однако это определение является всегда ненадежным, вследствие необходимости производить слишком большое число

наблюдений, которые, не будучи никогда достаточно точными, ввиду малости величин, подлежащих измерению, могут привести в совокупности к значительным ошибкам. Не следует удивляться даже тому, что неизвестное может приобрести противоположный знак; иными словами, можно ошибиться не только в самой величине, но также и в том, будет ли она положительной или отрицательной. Кроме того, в этом решении мы предполагали, что весь свет отражался или пропускался и что никакая часть его не погашалась поверхностью; если, однако, одна из этих поверхностей поглощает некоторую часть лучей, подобно тому как это делает последняя поверхность, то необходимо ввести новую неизвестную, что сильно усложнит задачу. Мы будем, следовательно, вынуждены прибегнуть к новому наблюдению, отличному от тех, кои уже были использованы нами, и величины, которые мы должны получить, еще более неотвратимым образом затеряются среди погрешностей наших данных.

Наконец, напрягши свою мысль, я придумал способ, по моему мнению достаточно точный, который должен был бы притти мне в голову значительно ранее. Этот способ является почти столь же непосредственным, как если бы мы поместили глаз внутри самого прозрачного тела, дабы наблюдать изображение, даваемое второю поверхностью, прежде чем оно претерпело изменение. Способ состоит в сравнении опытов, сделанных с двумя кусками стекла, один из которых имеет толщину в два раза бо́льшую, нежели второй, причем следует весьма позаботиться о том, чтобы материал их был совершенно однороден. Я вырезал их для этого из одного большого куска. Я выбирал самое толстое стекло и получал из него два образца, вырезая их один около другого, причем длина одного из них была в два раза более длины другого.

Образцы, с которыми производились описываемые ниже опыты, были вырезаны из куска весьма белого стекла, не имевшего того легкого черноватого оттенка, который я замечал в других стеклах, считавшихся весьма хорошими. Этот кусок

имел 5 линий в толщину; нашим двум образцам была придана длина в 8 линий и в 4 линии. Свет проходил и явления разыгрывались именно в направлении этой длины. Я исследовал, прежде всего, насколько их внешняя грань ослабляла свет вследствие отражения, и нашел, что при угле падения в 75° свет ослаблялся в 36 раз, иначе говоря из 1000 лучей было всего лишь 28 отраженных. Затем я помещал на место зеркала, изображенного на фиг. 3, два куска стекла, один поверх другого, в направлении *BC* и располагал две дощечки *D* и *E* таким образом, чтобы угол падения составлял 75°. Я свел эти дощечки к маленьким экранчикам или предметам, имевшим форму квадратов, со сторонами всего лишь в $1^1/_2$ или 2 линии. Наконец, вместо того, чтобы сравнивать одно из изображений с другим предметом, видимым непосредственно или без введения какого-либо прозрачного тела, я сравниваю внутреннее изображение, получавшееся в стеклянном образце, длиною всего лишь в 4 линии, с другим предметом, рассматриваемым сквозь 8 линий длины второго образца.

Уже при самом беглом взгляде ясно, что оба предмета были помещены мною в совершенно одинаковые условия и что между ними не должно было проявляться никакого различия, кроме того, которое проистекало вследствие внутреннего отражения, силу коего я хотел определить и которое происходило в более коротком образце. Отражения, производимые при входе света в оба образца, совершались под одним и тем же углом в 75° и должны были приводить к одинаковым ослаблениям света; то же самое имело место и при выходе света. Кроме того, пучки света имели в обоих образцах в точности одинаковую длину, ибо путь света в образце, в два раза более коротком, дававшем мне изображение посредством внутреннего отражения, был удвоенным; однако этот двойной путь был равноценен ординарному прямому пути, проходимому светом в другом образце, в два раза более длинном. Правда, все эти изменения происходили не в одной и той же последовательности; однако, поскольку каждое из них может быть выражено

отношением, то безразлично, в каком порядке они происходят: результат должен быть всегда одним и тем же.

Таким образом, поскольку в том и в другом случае все происходит совершенно одинаково, за исключением одного внутреннего отражения в более коротком образце, мы можем отвлечься от всех этих изменений, считая их как бы сторонними. Мы находимся в точности в том же положении, как если бы мы непосредственно сравнивали внутреннее изображение, о котором идет речь, с другим предметом, рассматриваемым непосредственно, без введения хрустального образца бóльшей длины. При этом мне пришлось, понятно, значительно приблизить свечу к дощечке, которую я видел благодаря отражению. Расстояние от одной дощечки до другой составляло 100 дюймов, и мне пришлось поместить свечу на расстояние всего лишь в 16 дюймов от первой дощечки, что сделало расстояние от свечи до второй дощечки равным 84 дюймам. Отсюда следует, что внутреннее отражение ослабляет свет в 27 или 28 раз при угле падения в 75°, и, поскольку внешнее отражение, происходящее под тем же углом, ослабляет свет в 36 раз, мы видим, что внутреннее отражение является несколько более сильным.

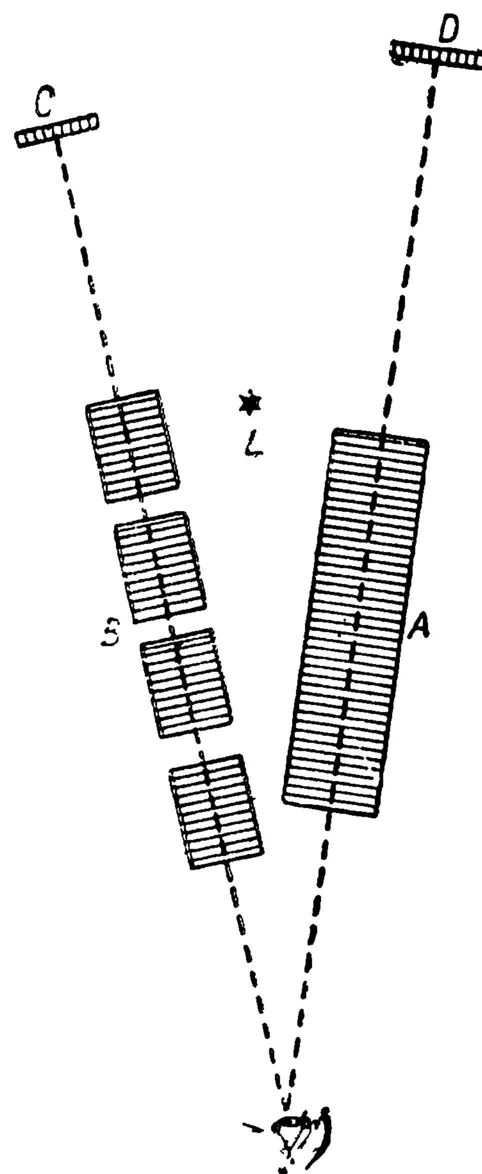
Повторяя этот опыт с этими же и с иными кусками стекла, я находил иногда оба отражения одинаково сильными, однако внутреннее отражение обычно казалось мне более ярким. Изображение, отражаемое вовнутрь, было всегда немного более красным, нежели тот предмет, который был виден непосредственно сквозь другой кусок стекла. Это являлось некоторым неудобством; однако имелось и другое, более значительное неудобство, проистекавшее от несовершенства стекол, коими я пользовался: они имели в том направлении, в котором их пронизывал свет, прожилия, в большей или меньшей степени вредившие прозрачности. Эти кажущиеся прожилия являлись в действительности различными слоями вещества и проистекали от способа, коим последнее отливалось. Стекла оказываются значительно более прозрачными, если рассматривать их в на-

правлении их истинной толщины; я не располагал, однако, стеклами, из которых одно было бы в два раза толще другого и которые наверняка состояли бы из одного и того же вещества.

ГЛАВА IX

О свете, поглощаемом или погашаемом поверхностями прозрачных тел независимо от отражений

Мы только что видели, что все поверхности прозрачных тел поглощают или погашают некоторое количество света, падающего на их внутреннюю сторону под углами, меньшими некоторой предельной величины. Предположив, что они до некоторой степени сохраняют это свойство и при бо́льших углах падения, возвращающих им почти всю их прозрачность, я возымел желание исследовать оное. Дело, стало быть, заключалось в том, чтобы отделить действие этого погашения света от всех остальных действий, неизменно ему сопутствующих.



Фиг. 19.

Для этой цели я положил сбоку от куска стекла A (фиг. 19) четыре других куска B, имевших все вместе в точности ту же длину, что и первый. Они были расположены несколько наклонно по отношению к дощечкам C и D. Я решил сделать первый угол падения равным 75°; я оставил также некоторый промежуток между четырьмя кусками стекла B, дабы избежать всякого мешающего отражения. Проходя, с одной стороны, эти четыре куска стекла, а с другой — кусок A, свет должен ослабляться равным образом, если отвлечься от отражений. Свет должен проходить пути равной длины; однако в случае четырех кусков B он претерпевает шесть лишних отражений,

входя и выходя в три последних куска. Наблюдение, действительно, показало мне это различие. Мне пришлось приблизить дощечку *C* к свече *L*, дабы придать обоим изображениям или предметам одинаковую яркость. У меня создалось впечатление, что уменьшение, производимое этими шестью отражениями, происходило в отношении 360 000 к 243 049.[85]

Это уменьшение, как мы видим, причиняется обеими поверхностями трех кусков стекла, и каждый кусок, очевидно, вносит в это уменьшение равную или пропорциональную долю, то есть уменьшает свет в том же отношении, что и другие. Таким образом, каждый кусок должен ослаблять свет в отношении 1000 к 877, каковое, будучи повторено три раза, дает отношение 360 000 к 243 049. Строго говоря, мы могли бы для получения простого соотношения удовольствоваться помещением в *B* двух кусков стекла, совместная длина которых равнялась бы длине куска, помещенного в *A*. Мы воспользовались четырьмя кусками, дабы сделать изменения света более доступными наблюдению, ибо, будучи обязаны подразделять это изменение, мы подразделяем также и ошибку в определении оного, если таковая существует.

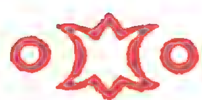
Однако это простое уменьшение, претерпеваемое светом, проходящим сквозь обе поверхности стекла, оказывается существенно более сильным, нежели то вытекает из совокупности двух отражений, внешнего и внутреннего. Таким образом, неизбежно существует какая-то иная, скрытая причина изменения. Внешнее отражение причиняет уменьшение на одну 36-ю часть, ибо наши куски хрусталя были взяты из того же стекла, что и куски, о которых шла речь в предыдущей главе, и, кроме того, были одинаково и достаточно совершенно отполированы. Следовательно, внешнее отражение сводило свет от 1000 ступеней к 972. Другое отражение, происходящее на внутренней части второй поверхности, причиняет уменьшение на одну 27-ю или одну 28-ю часть, иными словами, сводит 972 ступени к 936. Мы получаем, следовательно, в итоге совокупного действия двух отражений 936 ступеней; однако,

если мы сравним их с 877 ступенями, получающимися в результате непосредственного наблюдения силы света, претерпевшего всю потерю, вызываемую прохождением сквозь две поверхности, то мы заключим, что погашается примерно одна 16-я часть света, поскольку сила света в итоге двух отражений уменьшается от 1000 ступеней лишь до 936, а не до 877 ступеней. Это нельзя приписать ничему иному, кроме как влиянию второй поверхности, которая продолжает действовать, как если бы она была еще несколько менее прозрачною. Она погашала при всех углах падения, лежащих между нулем и 49°49′, треть или четверть лучей; как мы видели, при бо́льших углах она начинает внезапно поглощать значительно меньшую часть лучей; теперь мы находим, что она еще сохраняет в некоторой степени это свойство при почти перпендикулярном падении.

Я повторил то же наблюдение с другими кусками стекла, и если я и не получил тех же самых результатов, то все же неизменно наблюдал разницу того же рода, которая указывала мне на существование поглощения света. Часто я находил, что оно составляло примерно одну 24-ю часть или даже равнялось внутреннему отражению света. Я не могу сказать, должно ли приписываться это расхождение в определениях одному только различию в кусках стекла или неизбежным ошибкам наблюдения. Быть может, сказывается и то и другое. Как бы то ни было, я склоняюсь к тому, чтобы отдать предпочтение последним результатам. Таким образом, принимая одну 36-ю часть для ослабления, причиняемого внешним отражением от стекла при больших углах падения, и одну 27-ю или одну 28-ю часть для внутреннего отражения, претерпеваемого светом, возвращающимся вспять в прозрачном теле, когда свет подходит к внутренней границе оного, я беру подобную часть для происходящего в то же самое время ослабления лучей.[86]

Наконец, в громадном числе случаев речь идет не столько о разделении этих трех различных изменений, сколько об их совместном действии. Все три вместе ослабляют свет, при-

мерно, на одну десятую часть в кусках нашего обычного стекла, подвергнутых достаточной полировке. Мы не устанем, однако, повторять, что не следует ничего утверждать слишком уверенно, когда мы вынуждены основываться на наблюдениях, требующих столь изощренного внимания или, скорее, скрупулезности, в особенности в отношении третьего из изменений, нахождение которого связано с наибольшими трудностями.



РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ОБ ОТРАЖЕНИИ СВЕТА НА МАТОВЫХ ИЛИ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

ГЛАВА I

О том, что интенсивность света, отражаемого матовыми поверхностями, не может быть вычислена, если исходить из гладких маленьких полусфер [87]

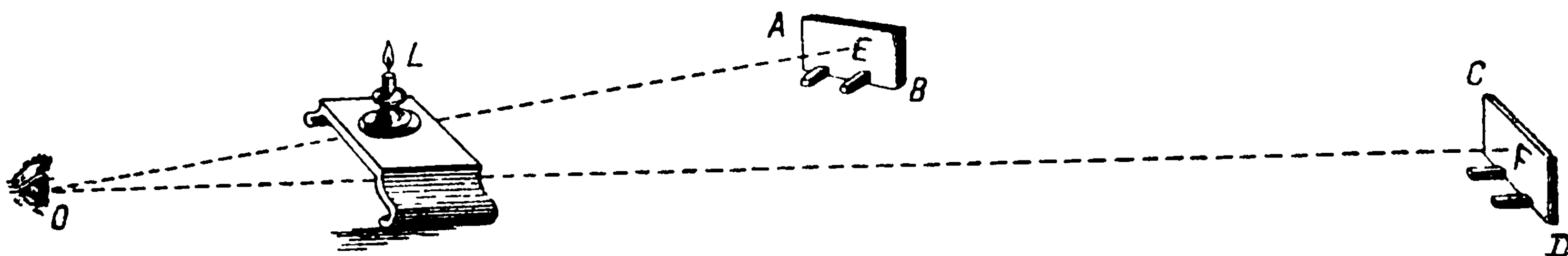
Мы полагаем, что достаточно занимались отражением света на гладких поверхностях и что теперь должны распространить наши изыскания на матовые или шероховатые поверхности, пример которых являют нам поверхности бесконечного множества окружающих нас тел. Эти последние поверхности имеют бесчисленное множество маленьких шероховатостей или выпуклостей, которые, будучи обращены своими маленькими гранями во все стороны, отражают свет во всех направлениях. Лучи, потерянные для одного наблюдателя, служат другому, находящемуся в ином месте, и вполне возможно, что интенсивность света или яркость цвета поверхности представляется им обоим совершенно одинаковою. Маленькие полусферы, которыми, как мы предполагали в первом разделе, покрыты некоторые поверхности, передают суть дела с достаточною точностью, если, впрочем, не ограничиваться именно маленькими полусферами, а прибегать также к помощи иных фигур, руководясь при этом обстоятельствами дела или наблюдениями. Если мы

сможем постичь распределение тех маленьких граней, которыми неровности обращены в каждую сторону, то мы окажемся как бы у самого источника большей части явлений и будем в состоянии сделать бесчисленное множество заключений касательно света, посылаемого нам обычными телами; и это будет не столько вымышленною гипотезою, сколько постигнутою сущностью самого предмета.

ГЛАВА II

Способ наблюдать различные интенсивности света, отражаемого поверхностями, рассматриваемыми в том же направлении, в котором они освещаются

Мы полагали возможным преуспеть в этих наблюдениях, воспользовавшись двумя совершенно сходными поверхностями, имеющими одинаковую интенсивность цвета, которую мы изме-



Фиг. 20.

няли у одной поверхности, придавая ей различный наклон, а у другой поверхности — удаляя ее на большее или меньшее расстояние, дабы иметь возможность отнести действие, производимое одним только наклоном первой поверхности, к действию, производимому всегда известною удаленностью второй поверхности. Эта последняя обозначена на фиг. 20 через *DC*. Я располагаю ее на различных расстояниях от свечи или лампы *L*, заставляя свет падать на нее перпендикулярно; поверхность же *AB* я помещаю всегда на одном и том же расстоянии, но придаю ей более или менее наклонное положение. Чем сильнее я уменьшаю угол падения на вторую поверхность, тем более она теряет в яркости своего цвета или света, и я без труда могу

оценить точную величину изменения, удаляя другую поверхность *CD*, то есть ту, на которую свет падает перпендикулярно, до тех пор, пока обе интенсивности не покажутся мне совершенно одинаковыми, когда я располагаю свой глаз в некоторой точке *O*. Квадрат расстояния *LF* дает мне, очевидно, выражение для интенсивности света той и другой поверхности. Одним словом, если я вынужден удалить вторую поверхность от свечи на расстояние в три или четыре раза большее, то это значит, что наклон первой поверхности *AB* заставляет силу, или интенсивность ее цвета уменьшиться в 9 или 16 раз.

Я применил этот способ к серебряным пластинкам, которые г-н Жермен, королевский ювелир, матировал с величайшею тонкостью и отбелил затем разбавленною азотною кислотою. Они намного превосходили белизною самую лучшую бумагу. Когда я располагал поверхность *AB* на расстоянии 60 дюймов от свечи и делал угол падения равным 75°, интенсивность ее белизны ослаблялась настолько, что я был вынужден относить другую пластинку на 7 дюймов далее, то есть на расстояние в 67 дюймов от свечи. Когда я делал угол падения равным 60°, мне приходилось удалять другую пластинку на 75 дюймов от светящего тела. Наклон пластинки *AB*, равный 45°, вызывал еще большее изменение, и я должен был помещать другую пластинку на расстоянии в 89 дюймов. Наконец, наклоны в 30 и 15° оказались равноценными расстояниям в $105^3/_4$ и 131 дюймов.

Подобные же опыты были проделаны со многими другими поверхностями, например с поверхностью гладкого мрамора, с поверхностью гипса, с поверхностью голландской бумаги и т. д. Однако я ограничусь здесь тем, что добавлю к подробно изложенным предыдущим опытам описание последующих, сделанных мною с гипсом самого лучшего качества и самой бóльшей белизны. Я сделал расстояние между свечою и первою поверхностью *AB* равным 24 дюймам; когда я сделал угол падения равным 75°, то мне пришлось удалить от свечи вторую поверхность *CD*, на которую свет падал перпендикулярно

и которая служила мерою сравнения, на $27^1/_2$ дюймов. Угол падения в 60° привел к необходимости удалить другую поверхность на расстояние в 30 дюймов от свечи; прочим углам падения в 45, 30 и 15° отвечали расстояния в 33, $40^1/_2$ и $54^1/_2$ дюйма.

Если выразить через 1000 яркость, которую имеет поверхность *AB*, или интенсивность отражаемого ею света, когда она и освещается и рассматривается в перпендикулярном направлении, то яркость ее света при других наклонах оказывается выраженною через числа, которые я привожу в следующей табличке.[88]

Наклон падающих и зрительных лучей по отношению к поверхности (в градусах)	Яркость поверхности или интенсивность отражаемого ею света		
	матовое серебро	гипс	голландская бумага
90	1000	1000	1000
75	802	762	971
60	640	640	743
45	455	529	507
30	319	352	332
15	209	194	203

ГЛАВА III

О распределении маленьких неровностей, существование которых вытекает из предыдущих опытов

Мы видим, что эти поверхности не имеют одинакового числа маленьких граней, обращенных во все стороны, а что число граней, отсылающих свет при малых наклонах, значительно менее числа тех, которые отсылают свет при больших углах. Во всех исследованных мною случаях получалось, примерно, одно и то же. Распределение является не в точности

одинаковым, однако все поверхности оказываются весьма сходными, и я не нашел ни одной поверхности, шероховатости или выпуклости которой были бы равноценны маленьким полусферам.

Кроме того, следует заметить, что если достаточно взять отношение обратных квадратов расстояний до второй поверхности, чтобы узнать, по какому закону изменяется яркость первой поверхности или интенсивность отражаемого ею света в зависимости от различного наклона, то для того чтобы найти распределение маленьких выпуклостей или, что то же, определить число отражаемых ими лучей, необходимо принять во внимание некоторые дополнительные обстоятельства. В этой второй части изыскания необходимо непременно учитывать наклон зрительных лучей относительно поверхности, ибо ее яркость или интенсивность ее цвета должны получаться из опытов увеличенными в большей или меньшей мере, в зависимости от большего или меньшего наклона, под которым рассматривалась эта поверхность. Действительно, когда поверхность рассматривается под меньшим углом наклона, ее изображение на сетчатке занимает меньшую площадь и, следовательно, лучи, отражаемые маленькими гранями, оказываются расположенными в более тесном соседстве друг с другом.

Мы нашли, например, для гипса, что изменение интенсивности света при переходе от перпендикулярного освещения поверхности к освещению под углом падения в 30° отвечает расстояниям в 24 и в $40^1/_2$ дюймов. Обратные квадраты этих двух чисел показывают нам, как будто, что число маленьких неровностей, отражающих свет в направлении, перпендикулярном к поверхности, более числа неровностей, отражающих в другом направлении, в отношении 1640 к 576; однако число неровностей, маленькие грани которых наклонны, является в действительности еще в два раза меньшим, составляя 288, сравнительно с числом 1640, выражающим численность первых выпуклостей. Причина этого была уже указана. Когда число маленьких граней получилось, при наклоне

в 30°, равным 576, то оно было как бы удвоено вследствие того, что изображение на дне глаза, образуемое тем же числом лучей, было в два раза меньшим, что в действительности удваивало его интенсивность. Итак, дабы узнать численность маленьких граней, надлежит присовокупить к обратной пропорциональности квадратам расстояний второй поверхности *CD* от свечи прямую пропорциональность синусам углов, образованных зрительными лучами и поверхностью *AB*. Другими словами, следует неизменно делить синусы наклона одной поверхности на квадраты расстояния другой. Выражая полный синус через единицу, мы имеем, стало быть, для маленьких неровностей, обращенных своими гранями в сторону, перпендикулярную поверхности, величину $\frac{1}{576}$, тогда как численность маленьких граней, отвечающих падению в 30°, будет выражаться через $\frac{\frac{1}{2}}{1680}$ или $\frac{1}{3360}$.

Действуя сообразно этому правилу и принимая число маленьких граней, обращенных в направлении, перпендикулярном к большой поверхности или параллельных этой поверхности, равным 1000, я нашел величины, отмеченные в таблице,

Наклоны маленьких граней относительно большой поверхности (в градусах)	Распределение маленьких неровностей или их маленьких граней		
	для матового серебра	для гипса	для голландской бумаги
0	1000	1000	1000
15	777	736	937
30	554	554	545
45	333	374	358
60	161	176	166
75	53	50	52

для пластинок из матового серебра, для поверхности гипса и для лучшей голландской бумаги, которую я разглядывал в направлении маленьких бороздок, коими она покрыта. Наклоны, приведенные в первом столбце, являются дополнительными к наклонам, приведенным в предыдущей таблице, ибо маленькие грани перпендикулярны падающему и зрительному лучам, о которых тогда шла речь; наклоны же отсчитываются всегда одинаковым образом от большой поверхности.[89]

ГЛАВА IV

О выражении маленьких неровностей через ординаты кривой линии

Как видно, нам удается, так сказать, пересчитать те маленькие грани, которые в каждом теле обращены во всевозможные стороны и которые мы различаем друг от друга, придавая поверхности различные наклоны, несмотря на то, что каждая из этих маленьких граней сама по себе не может быть замечена. Известные геометрам методы интерполяции позволяют в случае необходимости без труда расширить нашу маленькую таблицу и сделать так, чтобы она охватывала все возможные положения маленьких граней. Однако вместо того, чтобы выражать их отношения числами, будет столь же просто и столь же естественно выражать их с помощью ординат кривой линии. В этом заключается единственный способ охватить одним взглядом во всех подробностях бесчисленное множество фактов и иметь возможность вывести без труда все самые разнообразные следствия; этот способ, однако, надлежит применять с мудрою осторожностью, почти неизменно необходимою в вопросах физики.

Если восставить в середине матовой или шероховатой поверхности *AB*, на фиг. 21, перпендикуляр *CD* и положить его равным 1000 частям, дабы выразить сумму или численность маленьких граней шероховатой поверхности, перпендикулярных этому направлению, то на всех остальных радиусах полу-

окружности EDF надобно будет отложить соответствующие числа нашей маленькой таблицы, обратив внимание на то, что градусы полуокружности означают здесь наклоны лучей, тогда как в маленькой таблице отмечались наклоны самих маленьких граней, являющиеся дополнениями первых. Положим, например, дело идет о поверхности гипса; тогда мы отложим на радиусе, идущем под углом 60°, начиная от точки C до точки G, 554 части, начиная от точки C до точки H—176 частей и, проделывая то же самое для всех остальных радиусов, найдем достаточно большое число точек, чтобы иметь возможность провести кривую $CHDH$, дающую шкалу, которой будут следовать обращенные во все стороны маленькие грани.

Фиг. 21.

Грани, имеющие один и тот же наклон, распределены равномерно по всей шероховатой поверхности, поскольку мы считаем ее повсюду равно матовой и имеющей одинаковый цвет; однако мы собираем мысленно все грани одного наклона и, представляя их как бы находящимися в центре поверхности, выражаем их все одновременно перпендикулярными им линиями CD, CG; эти линии являются ординатами нашей кривой, которой мы можем дать название *нумератрисы неровностей*.[90]

Эта кривая имеет почти всегда форму некоторого овала, вытянутого в длину; его нижняя часть обычно сходится в виде острия. В случае серебряных пластинок она может быть приближенно представлена двумя дугами окружностей, примерно по 114° каждая, если только уничтожить угол, образуемый вверху обеими дугами, несколько закруглив его. В случае гипса этот овал оказывается вверху заметно более острым, нежели внизу, и его ширина составляет примерно

лишь $\frac{11}{20}$ длины его оси CD. Его ширина для голландской бумаги составляет, примерно, две трети большой оси.

Если бы наша кривая, нумератриса неровностей, имела в точности форму круга $ChDh$, то шероховатые поверхности, даже при самом косом освещении, обладали бы весьма своеобразным свойством: при рассматривании их с той же стороны и под тем же наклоном они бы казались имеющими всегда одинаковую интенсивность цвета или света. Правда, если изменить достаточно сильно угол падения, сделав его, например, вместо прежних 90°, равным 30°, то ордината Ch, выражающая численность маленьких граней, освещаемых перпендикулярно, будет, согласно отношению синусов угла падения, в два раза меньшею, нежели CD, в силу свойств круга $ChDh$, хорды которого CD, Ch и т. д. пропорциональны синусам углов ECD, ECh. Это уменьшение, однако, окажется в точности восполненным, ибо, как мы уже неоднократно замечали, если зрительный луч hC составляет с поверхностью AB угол в 30°, то эта поверхность кажется нам суженною в два раза; в два раза меньшее количество лучей света, падающее на в два раза меньший участок сетчатки, произведет на каждую из ее точек действие, в точности равное прежнему. То же самое получится также и для всех других наклонов: они никак не будут сказываться на интенсивности цвета или света.

Отсюда следует, что окружность круга $ChDg$, рассматриваемая как нумератриса неровностей, разделяет два крайне различных случая отражения света, производимого шероховатыми поверхностями.[91] Во всех случаях, когда нумератриса у́же, нежели круг, поверхность теряет в интенсивности своего света или своего цвета при переходе от освещения под прямым углом к освещению под острым углом падения и наблюдению примерно в том же направлении. Если, напротив, нумератриса выступает из круга $ChDg$, например если она принимает форму полу-окружности EDF, как это было бы в том случае, если бы выпуклости были равноценны маленьким

полусферам, то шероховатая поверхность становится все более и более яркою, по мере того, как она освещается и рассматривается под все меньшим углом наклона *ECH*. Можно даже заметить, что в частном случае полусферических выпуклостей интенсивность света поверхностей становилась бы, в конце концов, бесконечной, ибо поверхность испускала бы всегда одинаковое количество света, сводясь, в то же самое время, ко все меньшему участку в глазу.

Следует, однако, иметь в виду, что здесь идет речь, главным образом, о косом отражении, сравниваемом с перпендикулярным отражением; дело в том, что вполне возможно, что в обеих нумератрисах, отвечающих двум различным гипотезам и разграничиваемых окружностью *ChDh*, два различных наклона будут соответствовать в точности одинаковой интенсивности света. Для этого достаточно, чтобы две ординаты *CG* и *CH* нумератрисы, отвечающей одной из гипотез, были в точности пропорциональны соответствующим ординатам нумератрисы неровностей, отвечающей другой гипотезе и лежащей вне *ChDh*. В этом случае маленькие грани, перпендикулярно освещаемые светом, а, следовательно, и сами количества отраженных лучей, будут уменьшаться в том же отношении, что и оба изображения поверхности *AB* в глазу, и интенсивность света будет по этой причине увеличиваться в той же мере, в какой она будет уменьшаться по другой причине как в случае первой, так и в случае второй гипотезы.

Впрочем, я полагаю, что искать нумератрисы неровностей, выступающие за пределы круга *ChDh*, следует не среди наших земных тел. Я считаю, что они имеются лишь у планет в собственном смысле слова, части которых представляются мне построенными несколько иначе, нежели части окружающих нас тел, как это будет показано более подробно в дальнейшем. Некоторые из планет имеют горы в два раза более высокие, чем наши, и поверхность их обладает поэтому соответственно большим числом маленьких наклоненных граней. Иными словами, число или сумма этих маленьких граней уменьшается

в меньшем отношении, нежели ординаты или хорды *Cg*, *Ch* круга *CgDh*. Мы вполне уверены в этом, ибо мы видим совершенно отчетливо, что края дисков многих планет, например Луны или Венеры, более ярки, нежели части, расположенные около середины.

ГЛАВА V

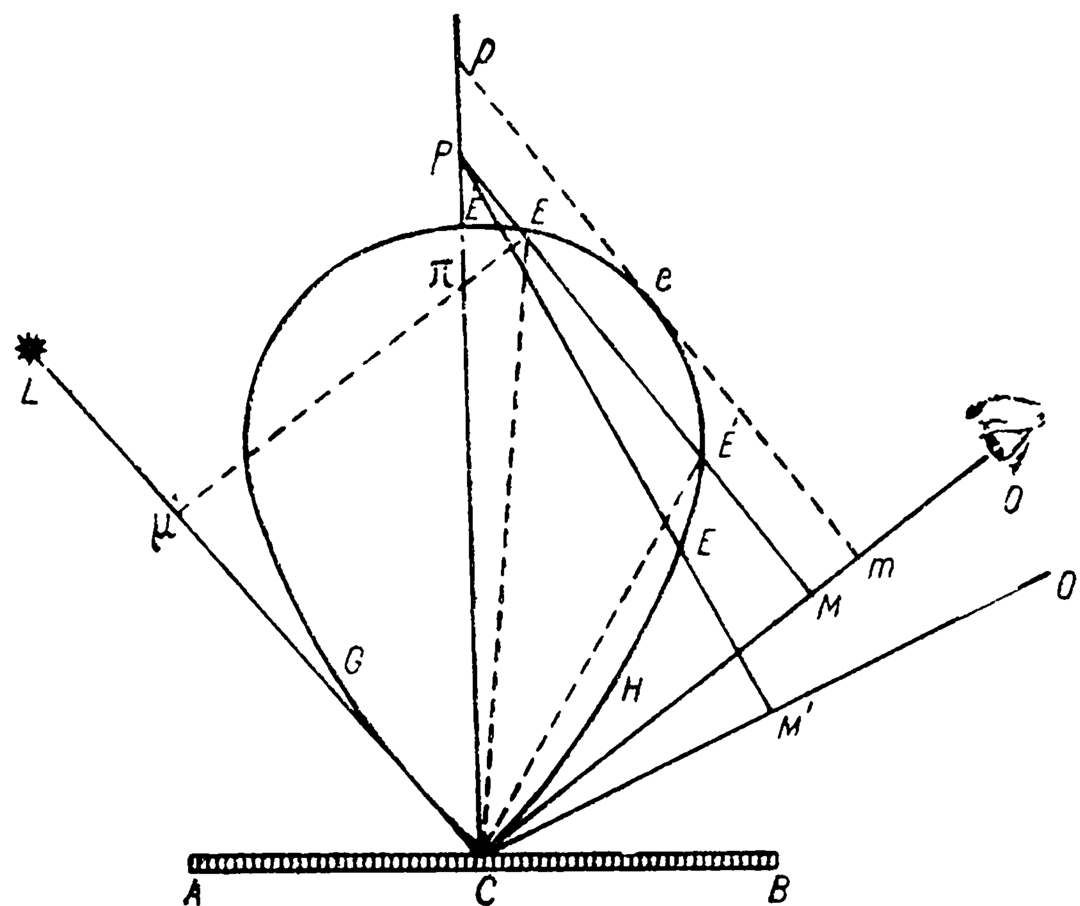
Об интенсивности света или цвета шероховатых поверхностей, освещаемых и рассматриваемых в двух совершенно различных направлениях, — важная теорема

Исследование становится несколько более трудным, и пользование нашей кривой линией требует более широкого приложения геометрии, когда поверхности освещаются в каком-либо одном направлении, а рассматриваются наблюдателем, находящимся на другой линии. Вот, однако, весьма общая и весьма простая теорема, в которой достаточно предположить светящее тело и глаз удаленными на достаточно большое расстояние от поверхности.

Если в этом случае разделить на две равные части с помощью ординаты CE (фиг. 22) *угол LCO, образуемый падающим лучом LC, исходящим из светящего тела, и зрительным лучом CO, кои сходятся в центре C поверхности AB, и если провести через крайнюю точку E ординаты перпендикуляр PM к зрительным лучам, то эта линия, пересекая в точке P ось нумератрисы CGEH, даст нам отрезок CP, выражающий яркость света на поверхности, или интенсивность ее цвета.*[92]

Доказательство этой теоремы не составляет никакого труда, и мы сведем его к простому объяснению. Прежде всего, совершенно очевидно, что ордината *CE*, которая делит угол *LCO* пополам и которую мы по этой причине будем иногда называть среднею ординатою, выражает величину маленьких граней, расположение которых позволяет им отражать свет в направлении наблюдателя. Однако число лучей, падающих на эти

маленькие грани, зависит не только от их величины, но также и от синуса падения, ибо чем менее этот синус, тем менее участок, подставляемый этими маленькими поверхностями под падающие лучи, и тем менее количество получаемого ими света. Поскольку ордината *CE* перпендикулярна маленьким граням, о которых идет речь, угол *ECL* или угол *ECO* является дополнительным к углу падения, и поэтому *CEM* равен самому



Фиг. 22.

углу падения; отсюда следует, что *CE*, выражающая величину маленьких граней, сводится к *CM* или получает количества света, пропорциональные лишь *CM*.

Хотя *CM* и выражает абсолютное или полное количество света, испускаемое в направлении *O*, однако речь идет об интенсивности этого света или цвета, приобретаемого поверхностью *AB*, а эта интенсивность, как мы видели, обратно пропорциональна синусу угла, образуемого зрительными лучами с поверхностью. Таким образом, в настоящем исследовании мы должны различать, так сказать, два различных угла падения: угол, образуемый лучами светящего тела, падающими на маленькие грани, и угол, образуемый зрительными лучами

с самою поверхностью AB. Этот последний равен углу CPM, и, поскольку свет представляется тем более сильным и лучи оказываются тем более сжатыми, чем менее синус этого угла или чем меньший участок занимает изображение на дне глаза, постольку следует увеличивать CM в том же отношении, в котором синус угла CPM менее полного синуса. Мы получаем, следовательно, для интенсивности света или для силы, с которою поверхность AB покажется освещенною наблюдателю, расположенному в O, величину CP.

Из этой теоремы можно вывести различные, достаточно любопытные следствия; мы удовольствуемся тем, что укажем на наиболее существенные из них.

ГЛАВА VI

Королларии к предыдущей теореме[93]

1. Очевидно, что для каждого положения наблюдателя светящее тело можно поместить в двух различных местах, причем производимые им действия будут совершенно одинаковыми в отношении интенсивности света или цвета поверхности. Прямая PM пересекает нумератрису неровностей в двух точках E и E'; каждая из этих двух точек обладает всеми свойствами другой, коль скоро оканчивающаяся там ордината делит пополам угол, образованный падающими лучами и зрительными лучами CO. Таким образом, нам остается лишь построить по другую сторону от CE' угол, равный OCE', и мы получим второе направление, которое должны иметь падающие лучи светящего тела, дабы поверхность казалась освещенною так же, как и в первом случае.

2. Если наблюдатель согласится изменять свое положение, то можно найти еще бесконечное число других совершенно равноценных положений светящего тела. Достаточно провести из точки P бесконечное множество прямых PM', пересекающих кривую; если опустить из точки C на эти прямые перпендикуляры CO', то последние укажут нам положения зрительных

лучей, и для каждого из этих положений всегда найдутся два совершенно равноценных положения светящего тела, причем прямые CE'' и CE''' будут служить средними ординатами.[94]

3. Зная положение глаза, найти направление, на котором надлежит расположить светящее тело, дабы поверхность была освещена как можно более сильно.

Мы видим также, что, зная положение глаза, весьма просто найти направление, на котором надлежит поместить светящее тело, дабы оно производило наисильнейшее действие. Достаточно провести к зрительному лучу CO перпендикуляр em таким образом, чтобы он являлся касательной к нашей кривой, он укажет максимум Cp интенсивности света, и мы всегда найдем расположение падающих лучей, перенося угол OCe по другую сторону от Ce.

4. Нетрудно заметить, что взаимная перемена места глаза и светящего тела почти всегда небезразлична, и если угодно увеличить яркость поверхности AB, то для глаза следует всегда предпочесть направление, составляющее меньший угол с этою поверхностью. Если мы расположим светящее тело на CO, а глаз на CL, то, хотя отражение света и будет производиться теми же самыми маленькими поверхностями, его абсолютное количество всегда будет прежним, тем не менее поверхность, рассматриваемая во втором случае под меньшим наклоном, покажется большею и лучи будут менее сжатыми. При этом мы окажемся вынужденными, согласно нашей общей теореме, опустить из точки E перпендикуляр $E\mu$ на ставший зрительным луч CL, и мы получим для интенсивности света величину, равную не CP, а $C\pi$.

Этот четвертый королларий может быть с такою же легкостью проверен на опыте, как и предыдущие; я проверил их все, и каждый опыт удавался мне в меру моих ожиданий, не давая точного или строгого согласия с предсказаниями теории, но неизменно подтверждая ее до известного пункта. Если должен был иметься максимум, то он действительно

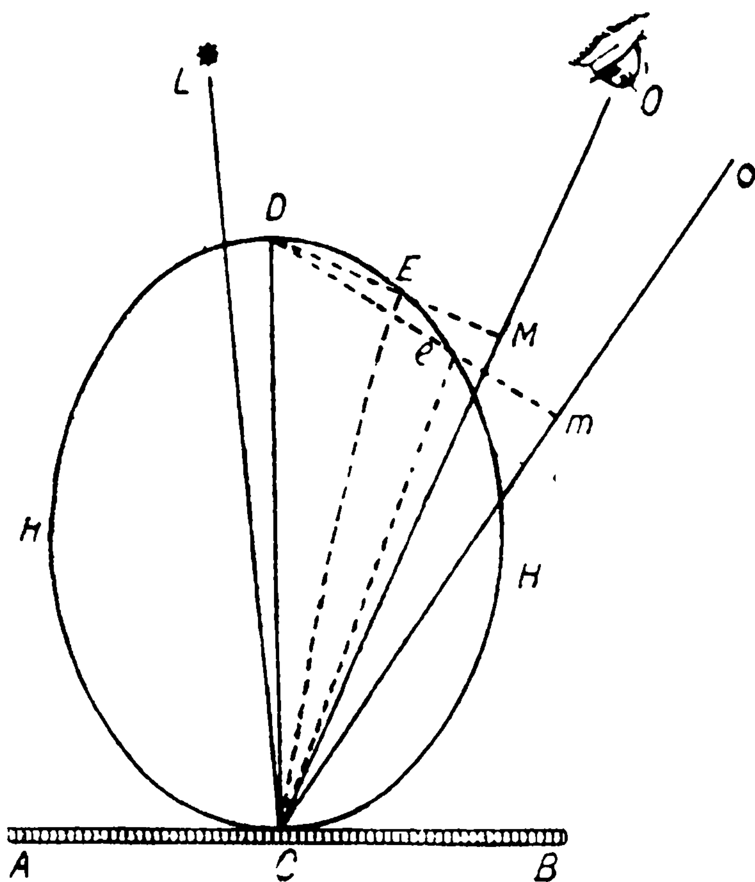
появлялся; если два света должны были иметь одинаковую интенсивность или если один из них должен был быть значительно более сильным или более слабым, то наблюдение находилось в согласии с этим, с тою лишь разницею, что иногда приходилось немного изменять направление.

5. О том, что поверхность может сохранять в точности одинаковую интенсивность своего света, каково бы ни было ее положение по отношению к падающим и зрительным лучам.

Наконец мы отметили выше, что нумератриса неровностей в случае матовых серебряных пластинок весьма близка к двум дугам окружности, равным 114° каждая. Это свойство порождает особенность, весьма заслуживающую внимания. Если угол, образуемый падающими лучами света с зрительными лучами, равен 66°, то каковы бы ни были положения, которые будет угодно придать серебряной пластинке, яркость ее белизны не претерпит никакого изменения. Это свойство вообще имеет место для всех нумератрис этого рода, и это составляет как бы новую теорему, которую мы полагаем необходимым отметить. *Во всех случаях, когда угол, составляемый падающими лучами с зрительными лучами, равен избытку 180° над каждою из дуг окружности нумератрисы, положение матовой поверхности, воспринимающей свет, никак не сказывается на интенсивности ее цвета.*

В этом легко будет убедиться, бросив взгляд на фиг. 23, на которой кривая линия *CHDH*, выражающая своими ординатами маленькие грани неровностей, образована двумя равными дугами окружностей.[95] Полагая *CE* среднею ординатою и проводя через точку *E* прямую *DEM*, мы опускаем из точки *C* перпендикуляр *CO* к этой линии, и нам остается лишь, как мы только что видели, сделать угол *ECL* равным углу *ECO*; тогда две линии *CL* и *CO* укажут нам направления, которые должны иметь падающий и зрительный лучи, дабы поверхность казалась освещенною светом, интенсивность которого выражается через *CD* и является тою интенсивностью,

которая получается при перпендикулярном освещении и при перпендикулярном рассматривании поверхности. Угол же CEM измеряется, в силу известного свойства круга, половиною дуги DEC, а угол ECM равен, следовательно, $90° - \frac{1}{2}\, DEC$. Таким образом, угол MCL, заключенный между падающим и зрительным лучами, равен $180° - DEC$. Точно то же самое получится, если взять в качестве средней ординаты любую другую хорду Ce. Угол Cem будет всегда в точности равен половине дуги DeC; угол mCe будет по отношению к нему дополнительным, а угол lCo, образованный падающим лучом lC с зрительным лучом Co и имеющий удвоенную по сравнению с предыдущим величину, будет, следовательно, избытком 180° над половиною всей дуги DC, в то время, как интенсивность цвета поверхности AB будет неизменно выражаться тою же линиею CD.



Фиг. 23.

Я не преминул проверить эту теорему, как и предыдущие, с помощью опыта, который облегчался тем, что в моем распоряжении находились серебряные пластинки, в точности подобные друг другу и одинаково матовые. Одну из них я оставлял в неизменном положении, добившись предварительно того, чтобы лучи света, получаемые ею, составляли угол в 66° с зрительными лучами. Поверхность имела одинаковый наклон как по отношению к одним, так и к другим лучам, или, что сводится к тому же, ось CD делила их угол пополам или служила среднею ординатою. Затем я помещал рядом другую пластинку и менял в широких пределах ее наклон по отношению к лучам. Она казалась мне во всех своих различных положениях столь же яркою, как и первая пластинка. Различие

начинало проявляться лишь тогда, когда пластинка была чрезмерно наклонена по отношению к падающим или зрительным лучам. Маленькие шероховатости, слишком заметные на этих пластинках, затеняли при этом друг друга, и я знал заранее, что эти особенные случаи должны быть исключены из рассмотрения.

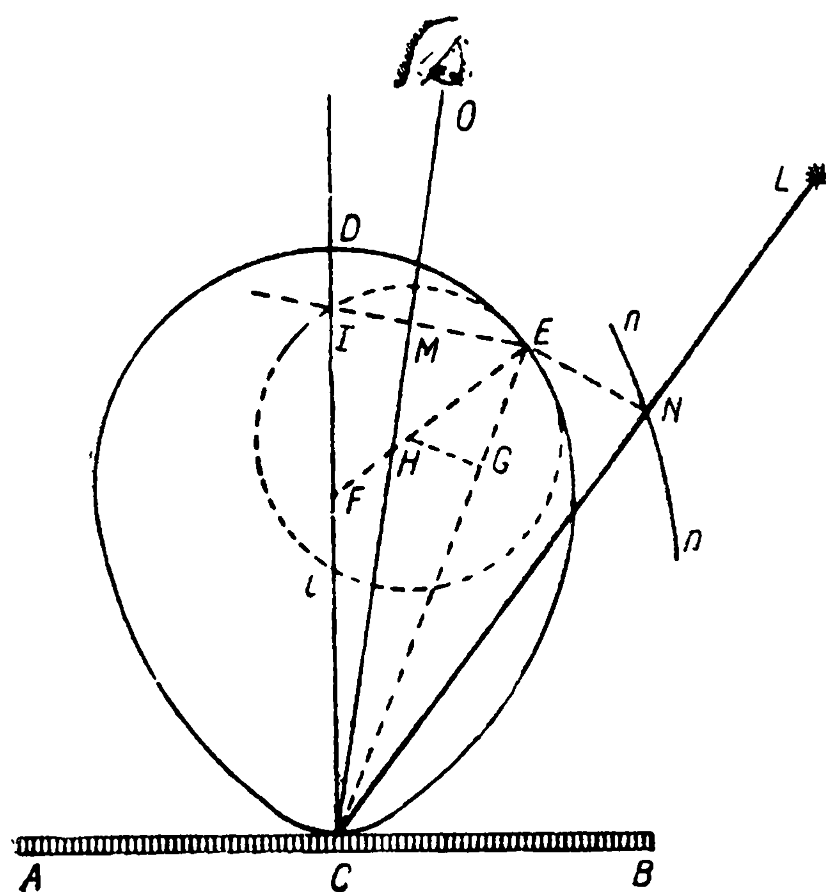
Эти изыскания можно было бы значительно расширить, приведя решение многих любопытных задач; мы ограничимся, однако, изложением принципов и будем остерегаться незаметного уклонения от нашего предмета, в которое мы впали бы, углубившись в чисто геометрические рассуждения. Поэтому мы удовольствуемся здесь прибавлением к решению задачи, обратной той, которую мы уже разрешили, другой, могущей оказаться в некоторых случаях полезной.

ГЛАВА VII

Зная положение светящего тела по отношению к матовой поверхности, найти направление, на котором надлежит поместить глаз, дабы интенсивность отраженного света была возможно большей

Чтобы разрешить эту задачу, достаточно восстановить в различных точках E нумератрисы неровностей (фиг. 24) перпендикуляры EF к кривой и провести из этих же точек ординаты EC. После этого мы строим из точки G, находящейся на расстоянии одной четверти от E, перпендикуляр GH, проведя его до встречи с линиею EF. Беря затем точку H за центр круга, проходящего через точку E, мы пересечем этим кругом ось CD в двух точках: I и i. Проведем через эти точки и точку E прямые, подобные EM, и, опуская на них из точки C перпендикуляр CM, перенесем EM в EN перпендикулярно падающему лучу света LC, положение которого задано, и отметим точку N. Разыщем тем же способом бесчисленное множество этих точек, последовательность которых образует

кривую nNn. Нам остается лишь найти точку, в которой эта кривая пересекает падающий луч LC, ибо, зная ее, мы легко определим положение, которое надлежит придать зрительному лучу, дабы интенсивность света поверхности имела максимум или минимум. Достаточно восставить из точек пересечения N перпендикуляр NE к падающему лучу; он пересечет нумератрису неровностей в E; эта точка укажет нам среднюю ординату CE, и нам останется лишь сделать угол ECO равным углу LCE, дабы узнать направление, которое следует придать зрительному лучу. Читатели, немного искушенные в высшей геометрии, без труда найдут решение этой, а также и нижеследующей задачи:

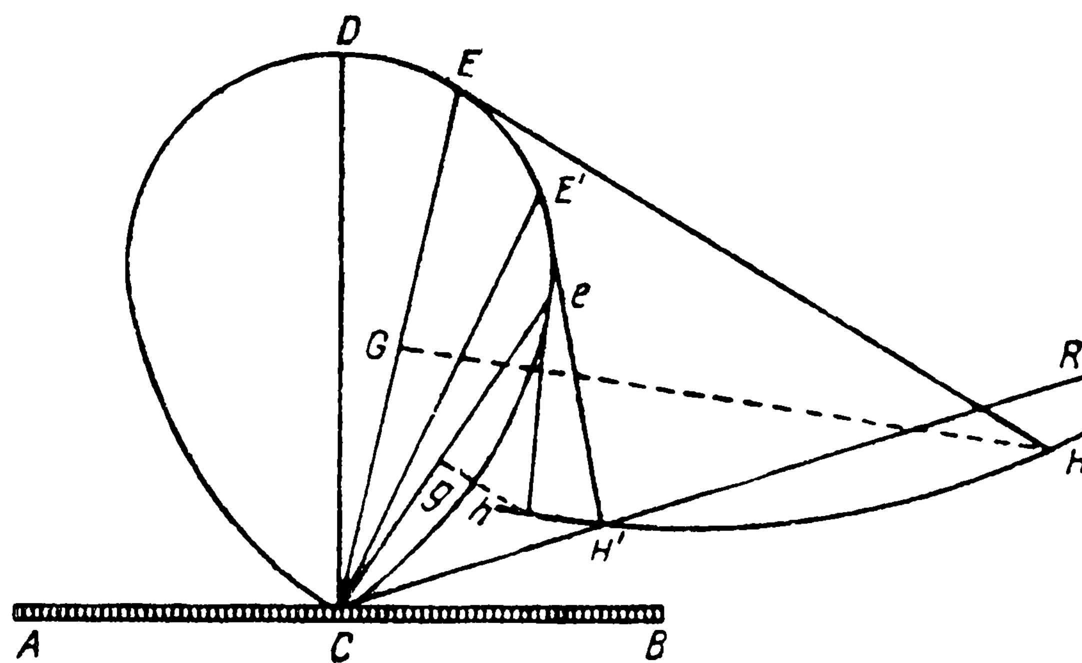


Фиг. 24.

Зная угол, образованный падающими лучами с зрительными лучами, найти положение, которое надлежит придать матовой поверхности, дабы ее яркость, или интенсивность ее цвета имела максимум.

Поверхность AB (фиг. 25) освещается светом светящего тела; угол, образуемый падающими лучами с зрительными лучами, является заданным, и требуется, чтобы интенсивность цвета этой поверхности имела максимум или минимум. Сделаем угол BCR равным половине угла между падающим и зрительными лучами. Построим для каждой точки E, e нумератрисы неровностей ординаты EC, eC и т. д. и проведем в то же время касательные EH, eh и т. д. к кривой; восставив затем из середины каждой ординаты перпендикуляры GH, gh, до пересечения с соответствующими касательными, мы получим бесконечное множество точек H, H', h и т. д. Последовательность

всех этих точек может в некоторых случаях образовать прямую линию; это получается, например, тогда, когда обе половины нумератрисы неровностей представляются двумя дугами окружности, как это имеет место в случае матовых серебряных пластинок; однако в общем случае все точки H, H', h сливаются в кривую линию, пересечение которой H' с прямою CR дает



Фиг. 25.

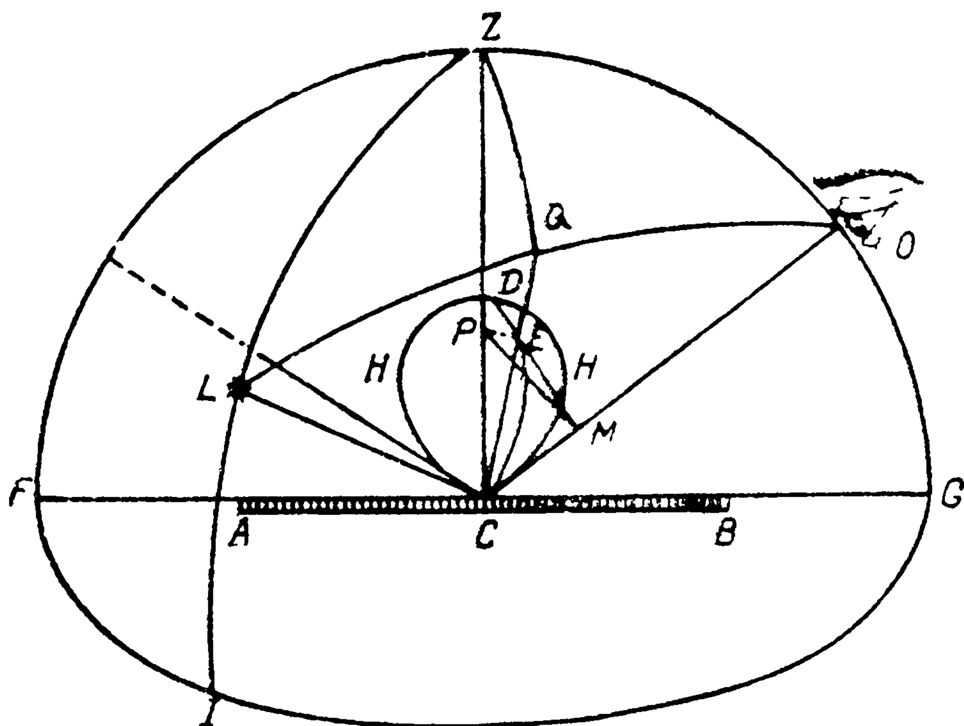
нам решение поставленной задачи. Действительно, остается лишь провести из точки пересечения H' касательную $H'E'$ к нумератрисе неровностей, и мы получим точку E', в которую следует провести среднюю ординату CE'. Таким образом, остается лишь расположить поверхность AB так, чтобы CE' делила пополам угол, образованный падающими и зрительными лучами; тогда поверхность будет иметь наиболее или наименее яркий из всех возможных цветов.[96]

ГЛАВА VIII

Об интенсивности света или цвета матовых поверхностей в том случае, когда плоскость, проходящая через их центр, светящее тело и глаз, не перпендикулярна этим поверхностям

Мы перестаем полагать матовую поверхность перпендикулярною к плоскости, проходящей через глаз и светящее тело,

и собираемся заняться общим рассмотрением вопроса, которое найдет себе приложение в гораздо большем числе случаев, нежели все частные изыскания, которые могли бы быть предприняты нами. Мы попрежнему предполагаем, что расстояние от светящего тела *L* (фиг. 26) и расстояние от глаза *O* до плоскости *AB* чрезвычайно велики по сравнению с диаметром этой плоскости.[97] Вообразим себе затем сферическую поверхность, проходящую через светящее тело и через глаз, центр которой находится в *C*. Глаз расположен в плоскости *FZG*, перпендикулярной к поверхности *AB*; светящее тело *L* лежит, однако, не в этой плоскости, а в другой, *IZC*, составляющей с первою заданный угол, измеряемый дугою *FI*; возвышение светящего тела над поверхностью *AB* определяется величиною *IL*, выражаемою определенным числом градусов. Все эти величины известны; если, кроме того, мы вообразим себе на сферической поверхности дугу большого круга *LO*, то величину ее можно будет определить без труда. Если мы воспользуемся для этой цели сферической тригонометрией, то нам достаточно будет решить треугольник *LZO*, в котором нам известны стороны *ZL* и *ZO*, а также заключенный между ними угол, и мы найдем дугу *LO*. Мы будем также искать угол *ZOL*, который нам понадобится в дальнейшем.



Фиг. 26.

Исходя из всего этого, мы видим, что в настоящем исследовании мы не можем ограничиваться рассмотрением нумератрисы неровностей как простой кривой *CHDH*, а должны сообщить ей вращение вокруг ее оси *DC*, дабы получить

коноидальную или сфероидальную поверхность. Средняя ордината, выражающая численность или величину маленьких граней, дающих нам при данных обстоятельствах полезное отражение, лежит на нумератрисе, перенесенной в *DEC*, и это среднее направление, будучи продолжено в *Q*, делит на-двое дугу *LO* или угол, образуемый падающим лучом *LC* с зрительным лучом *CO*.

Таким образом, мы будем знать угол, образуемый этою среднею ординатою с тем и с другим лучом. Нам останется лишь найти сторону *ZQ* в сферическом треугольнике *ZOQ*, в котором мы знаем *ZO* и в котором мы уже нашли *QO* и угол *O*. Мы получим угол *ZCQ*, составляемый направлением или среднею ординатою *CE* с осью *CD* нумератрисы *CED*; зная эту кривую линию, мы найдем длину средней ординаты.

Я опускаю из точки *E* перпендикуляр *EM* на зрительный луч и ищу *CM*. Для этого необходимо решить прямоугольный плоский треугольник, лежащий в плоскости *LCO*, для которого мы уже нашли углы и гипотенузу *CE*. Сторона *CM* выражает, как и прежде, маленькие грани выпуклостей, сокращенные вследствие наклоненности их по отношению к падающему на них свету. Наконец, я восстанавливаю из точки *M* в плоскости *FZG* перпендикуляр *MP* к зрительному лучу, продолжая его до оси *CD* нумератрисы, дабы получить *CP*; последняя величина будет тем большею по сравнению с *CM*, чем сильнее малость синуса угла *OCG*, образованного зрительным лучом и поверхностью *AB*, заставляет увеличиваться интенсивность света этой самой поверхности; очевидно, что *CP* дает нам искомую интенсивность.

Этот же способ может быть применен в том случае, когда матовая поверхность освещается одновременно несколькими светящими телами, например, когда она получает свет от всех точек видимого неба, будучи освещена дневным светом. При этом мы получим бесконечное множество различно наклоненных маленьких граней, вносящих свои доли в отражение. Мы будем иметь, следовательно, бесчисленное множество различ-

ных значений CP, и для того, чтобы узнать их совокупное действие, достаточно будет прибегнуть к обычным способам отыскания интегралов или сумм элементарных количеств. Приблизительно то же самое будет получаться в том случае, когда светящее тело и глаз будут находиться на расстоянии, которое нельзя считать бесконечным. При этом, однако, исследование окажется значительно более сложным, ибо придется, помимо прочих обстоятельств, принимать во внимание изменения угла OCG, который будет иметь большую или меньшую величину для различных точек поверхности AB, подобно тому, как это было описано в главе VI первого раздела.

ГЛАВА IX

О нумератрисе неровностей у планет

Опыты, описанные в главе II этого раздела, были поставлены в точности так, как если бы мы желали определить свет, посылаемый нам каждою точкою планеты в ее противостояниях. Каждая часть планеты освещается при этом лучами солнца с большим или меньшим наклоном, смотря по тому, насколько близко или далеко она расположена от края диска планеты, и мы видим ее под тем же наклоном. Дело, следовательно, обстоит совершенно так же, как и в том случае, когда мы производили наблюдения, представленные на фиг. 20; мы исследовали на серебряных пластинках и на других поверхностях, насколько изменялся тон их белизны при различных наклонах. Если бы Луна состояла из гипса и не имела никаких пятен, то табличка, приведенная в главе II, указывала бы нам различную силу ее света для всех ее точек. Если предположить, что планета изображается сферою на фиг. 13 (стр. 78), то точка E, удаленная от края A видимого диска на 30°, освещала бы нас лишь с силою, выражаемою числом 352, в то время как точка D освещала бы нас с силою, равною 1000. Однако эти небесные тела показывают нечто совершенно иное; в противоположность солнцу, их края оказываются более блестящими,

нежели части, расположенные вблизи центра; это и побудило нас сказать, что нумератриса их неровностей подобна некоторому овалу, имеющему большую ширину, нежели окружность.

С помощью непосредственных наблюдений можно найти яркость различных точек диска планеты и получить возможность начертить нумератрису ее неровностей. Ординаты этой кривой линии, не будучи пропорциональны ординатам круга $ChDh$ на фиг. 21, не пропорциональны также и синусам углов ACg, ACh; если мы обозначим эти синусы через s, то необходимо будет прибавить к ним по крайней мере некоторую постоянную величину b, дабы получить ординаты нумератрисы планет. Вместо единственной величины b можно было бы добавить к ним ряд других членов, умноженных на некоторые степени или функции s. Я полагаю, однако, что, остановившись на $s + \frac{bs^m}{a^m}$, мы получим выражение достаточно общее для всех случаев. Оно будет служить нам для планет в собственном смысле и его можно, обобщив, применять, если угодно, также и к солнцу; тогда это выражение, приобретающее вид $s - \frac{bs^m}{a^m}$, укажет, какое количество света посылается нам различными точками этого светила в зависимости от синуса s углов, образуемых лучами с поверхностью, из которой они исходят, и нам остается лишь сравнить это выражение с интенсивностями света, найденными путем наблюдений, произведеннных для трех различных точек, дабы иметь возможность определить не только величину постоянной b сравнительно с полным синусом a, но также и показатель степени m.

Если ограничиться для случая Солнца частным выражением $s - \frac{bs^2}{a^2}$, лишив величину m ее неопределенности, ибо мы не располагаем достаточным числом наблюдений над этим светилом и считать, что наблюдения, о которых мы говорили в главе XII второго раздела первой книги, являются точными, то, подставляя последовательно полный синус и три четверти этого синуса вместо s, мы найдем, что между $a - b$ и $\frac{3}{4}a -$

$-\frac{9}{16}b$ существует то же отношение, что и между 48 и 35; это дает для искомой величины b значение $\frac{1}{24}a$.[98]

ГЛАВА X

Вывести из однажды определенной нумератрисы неровностей величины яркости, которыми должны обладать различные точки планеты при всех возможных положениях ее относительно Солнца

Коль скоро нумератриса неровностей построена, все явления, относящиеся к свету планет и даже в тех случаях, когда

Фиг. 27.

она не находится в своих противостояниях, становятся весьма легко доступными расчету. Изобразим эту планету сферою на фиг. 27: она освещена Солнцем L, которое следует представлять находящимся на бесконечно далеком расстоянии, в то время как наблюдатель также чрезвычайно удален в

направлении EO. Положение точки C, яркость которой мы хотим оценить, нам полностью известно. Мы знаем, каково ее возвышение над плоскостью GMK, проходящею через центр планеты, центр Солнца и глаз наблюдателя. Она возвышается на величину дуги QC, синус которой равен CR, а точка Q удалена на величину всей дуги QM от зрительного луча OM, направленного к центру планеты и перпендикулярного ее видимому диску $GFKI$. Линия EP делит в точности надвое угол LEO, образованный падающими лучами Солнца с нашими зрительными лучами; этот угол считается одним и тем же для всех точек поверхности планеты.[99]

Если кривая CHD является нумератрисою неровностей планеты, то средняя линия CH, делящая этот угол надвое, в точности параллельна EP, и угол BCH равен углу ECR, поскольку стороны одного перпендикулярны сторонам другого. Поскольку ордината CH пропорциональна синусу угла BCH плюс некоторая величина, она, следовательно, будет также пропорциональною ES плюс величина, которую мы обозначим через $b \times \left(\frac{ES}{EK}\right)^m$, в согласии с тем, что мы только что говорили, то есть тем, что мы полагаем величину $ES + b\left(\frac{ES}{EK}\right)^m$ выражающей сумму всех маленьких выпуклостей или граней, способствующих созданию блеска вокруг точки C нашей планеты.

Если бы этот угол не был одним и тем же для всех точек поверхности планеты, то мы умножили бы эту сумму на синус угла падения прямых лучей. Поскольку угол OEL постоянен и EP параллельна CH, падающие лучи составляют с CH тот же угол, что и с EP; мы всегда рассматривали в качестве угла падения дополнение этого угла, и здесь мы опять будем поступать точно так же. Мы можем, следовательно, пренебречь этим умножением, не изменяющим ничего в соотношениях, кои мы желаем обнаружить; однако мы должны обратить сугубое внимание на угол, образуемый зрительными лучами и маленькою частью поверхности планеты вокруг точки C. Чем менее

синус этого угла или чем больше наклон, под которым мы видим окрестности точки C, тем большею должна казаться интенсивность их света, поскольку малая поверхность, не испытывая никакой убыли в падающем на нее свете, будет занимать на сетчатке, как мы уже неоднократно повторяли, меньшее место.

Я опускаю из точки R перпендикуляр RT на зрительный луч OE, направленный к центру планеты; из точки C я провожу линию CT, перпендикулярную к этому же зрительному лучу, и строю синус угла CEO. Поскольку CE перпендикулярна к поверхности планеты в точке C, а TC перпендикулярна зрительному лучу, угол ECT будет равен углу, образуемому зрительными лучами с поверхностью в точке C, и мы получим, следовательно, для синуса этого угла величину ET. Таким образом, нам остается лишь разделить величину $ES + b\left(\frac{ES}{EK}\right)^m$, являющуюся суммою маленьких выпуклостей для окрестностей точки C, на ET, и мы получим для яркости окрестностей точки C значение

$$\frac{ES + b\left(\frac{ES}{EK}\right)^m}{ET}.$$

Не составляет никакого труда найти частные значения, входящие в это общее выражение. Величины ES и ET легко разыскать с помощью либо прямолинейной, либо сферической тригонометрии. После этого останется лишь произвести то же вычисление для любой другой точки, и мы увидим, насколько интенсивность света в одной больше или меньше интенсивности света в другой.

ГЛАВА XI

О том, что на поверхности планеты всегда имеется бесчисленное множество одинаково ярких точек

Кроме того, очевидно, что на поверхности планеты есть бесчисленное множество точек, имеющих совершенно одинаковую яркость, и что это должно получаться всякий раз, когда

отношение между ET и $ES + b\left(\frac{ES}{EK}\right)^m$ таково же, каково отношение между соответствующими величинами, относящимися к другой точке, отличной от C. Если мы проведем в плоскости GMK линию sr, параллельную SR, и линию tr, параллельную TR, и если

$$\frac{Es + b\left(\frac{Es}{EK}\right)^m}{Et}$$

равно

$$\frac{ES + b\left(\frac{ES}{EK}\right)^m}{ET},$$

то совершенно ясно, что нам достаточно лишь восстановить из точки r, являющейся пересечением sr и tr, перпендикуляр к плоскости GMK, продолжая его вплоть до поверхности планеты, и он укажет нам другую точку, имеющую в точности ту же яркость, что и первая точка C.

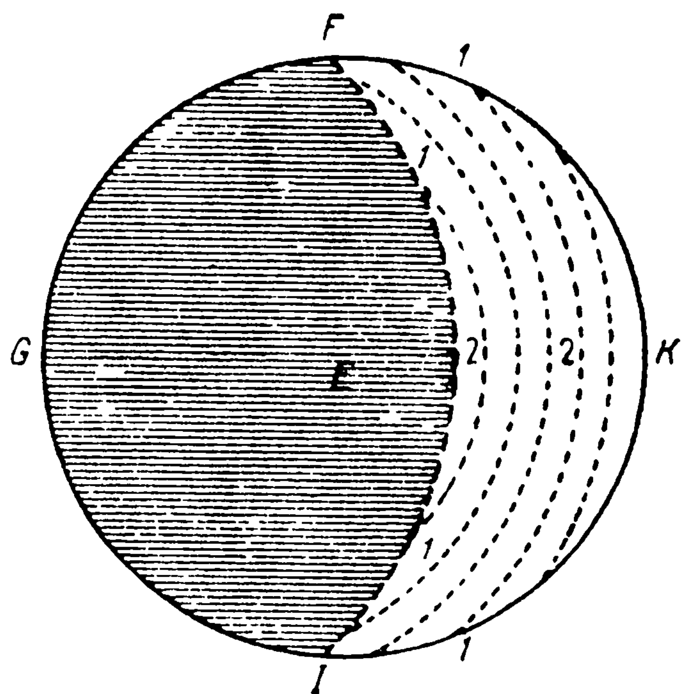
Мы располагаем, таким образом, способом найти непосредственным образом или, так сказать, a priori, хотя и в зависимости от некоторых предварительных наблюдений, бесчисленное множество точек, имеющих ту же яркость, что и точка C. Мы добавим к известной нам величине ES расстояние SP в качестве $b\left(\frac{ES}{EK}\right)^m$.

Проведя затем sr параллельно SR, мы прибавим также и к Es величину $sp = b\left(\frac{Es}{EK}\right)^m$, и если мы проведем линию pt, параллельную PT, установив между Ep и Et то же отношение, что и между EP и ET, то мы найдем точку t, из которой надлежит провести tr, параллельно TR, дабы получить точку соединения r, лежащую как раз под новою точкою c поверхности планеты, яркость которой такова же, какова яркость первой точки C.

ГЛАВА XII

Обстоятельства, при которых все одинаково светящие точки планеты расположены на дугах эллипса

Если ординаты *CH* нумератрисы неровностей будут просто пропорциональны синусам углов *BCH* плюс постоянная величина *b*, то короткие линии *SP*, *sp*, прибавляемые к синусам *ES*, *Es*, будут равны между собою, и будет нетрудно убедиться в том, что все точки *R*, *r* и т. д. окажутся при этом лежащими в точности на прямой линии. Таким образом, все перпендикуляры *RC*, *rc* и т. д., восстановленные из плоскости *GMK*, будут находиться в одной плоскости, и все точки поверхности планеты, имеющие одинаковую яркость, будут, следовательно, расположены на окружности маленького круга; однако этот маленький круг, рассматриваемый издалека и проектируемый на плоскость диска *GFK*, будет казаться дугою эллипса. Одним словом, все одинаково светящие точки планеты образуют части кривой линии, подобной 1—2—1 на фиг. 28, и чем эти дуги будут более удалены от центра, тем более будет возрастать яркость. Это согласуется достаточно хорошо с наблюдением, если только исключать крайние части этих кривых линий, на которых маленькие выпуклости перекрываются или заслоняют друг друга.



Фиг. 28.

При противостояниях все эллипсы переходят в совершенно концентрические круги, свет коих возрастает по мере приближения к краям диска. Однако для этого всегда необходимо, чтобы маленькие грани выпуклостей не были просто пропорциональными косинусу угла их наклона относительно большой поверхности, но чтобы к этим косинусам добавлялась некоторая величина, которая, даже будучи для них всех одинаковою, увеличивает одни из них сравнительно более, нежели другие.

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ОБ АБСОЛЮТНОЙ ВЕЛИЧИНЕ ГРАНЕЙ РАВНОГО НАКЛОНА НА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ И О КОЛИЧЕСТВЕ ПОЛНОГО СВЕТА, ОТРАЖАЕМОГО ИМИ

До сих пор мы сравнивали маленькие грани неровностей по величине лишь друг с другом, в зависимости от их большего или меньшего наклона; нельзя ли, однако, узнать о них более того? Нельзя ли было бы определить их абсолютным образом или найти, какую часть большой поверхности составляют все грани с одним и тем же наклоном? Это отношение должно иметь конечную величину, ибо хотя каждая грань чрезвычайно мала, грани с одинаковым наклоном имеются во всех частях большой поверхности, и их громадная численность должна восполнять их чрезвычайную малость. Мы уже видели, что в отношении отражения действие полусферических выпуклостей весьма сходно с действием, производимым поверхностью, когда последняя является совершенно полированною. Выпуклости всех прочих форм имеют, разумеется, сходные свойства, и мы не обязаны ограничиваться познанием одних только отношений, коль скоро возможно достигнуть определения абсолютных величин.

ГЛАВА I

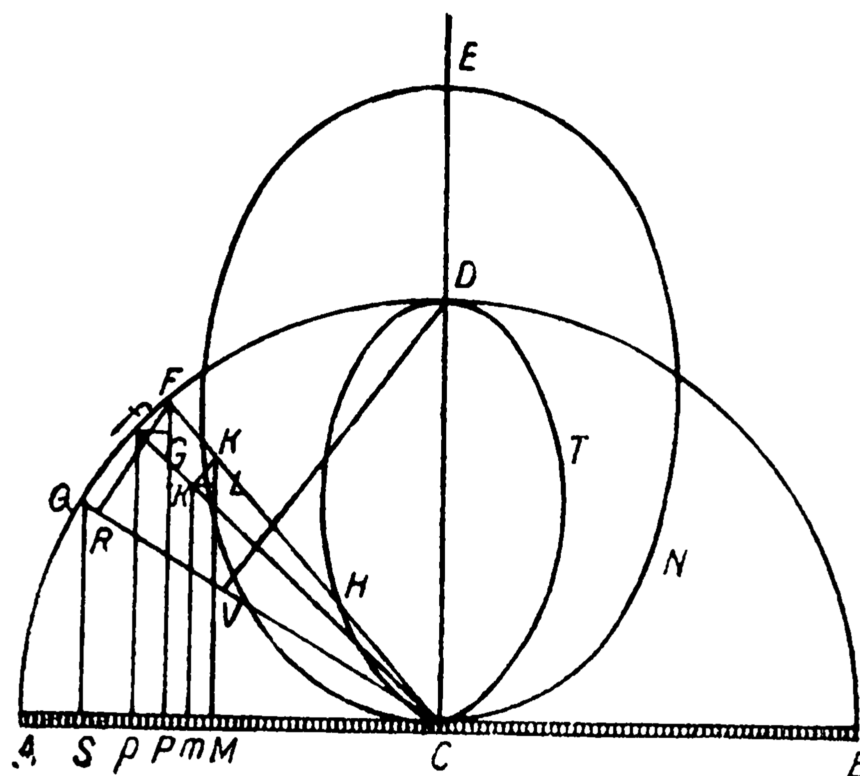
Определить для шероховатых поверхностей отношение между их общей площадью и площадью маленьких граней, имеющих любой заданный наклон

Эта задача не столь трудна, как может показаться сначала. Чем более число граней, имеющих определенный наклон, тем менее должно быть граней с иными наклонами, ибо, поскольку каждая из них занимает определенное место на большой поверхности, все они как бы взаимно исключают друг друга. Следовательно, зная из наблюдений закон, которому следуют в своем распределении маленькие грани, мы можем распределить площадь большой поверхности по этому закону и найти часть, занимаемую маленькими гранями с любым заданным наклоном. В этом исследовании необходимо лишь не упускать из виду одно существенное обстоятельство, а именно то, что маленькие грани, имеющие одинаковую величину, занимают большее или меньшее пространство, смотря по тому, больше или меньше они наклонены. Маленькая грань, параллельная большой поверхности, занимает на ней место, равное самой грани, тогда как иные грани занимают гораздо меньшие площади.

Мы усматриваем, таким образом, два различных способа решения задачи: один из них, пожалуй более изящный, заключается в геометрическом рассмотрении; другой же более близок к физике или к самой природе предмета. Мы можем мысленно заменить все маленькие выпуклости одним большим коноидом, подобным им и покрывающим всю большую поверхность; при этом вопрос сведется к разысканию фигуры неровностей из отношения, существующего между маленькими гранями с различными наклонами. Мы следовали этой методе в отношении поверхностей, выпуклости которых обращены равновеликими гранями во все стороны. Выпуклости имеют при этом форму маленьких полусфер, и мы воображали себе одну большую полусферу, равноценную всем маленьким. Однако есть все

основания полагать, что маленькие выпуклости не все подобны друг другу и что некоторые из них не обладают маленькими гранями, имеющими всевозможные наклоны. Одни из них имеют большее, а другие меньшее количество граней, и эта неравномерность исчезает лишь вследствие громадного их числа на каждой заметной части большой поверхности. Как бы то ни было, мы будем представлять площадь граней с любым заданным наклоном поверхностью круговой или, вернее, сферической зоны, которую мы будем рассматривать отдельно или как бы изолированно.

Мы будем придавать этой зоне сферическую форму потому, что каждая маленькая грань привносит свою долю в действие других граней, положение которых весьма мало отличается от положения ее самой. Кроме того, мы будем в этом исследовании неизменно полагать, что тело отражает кругом свет одинаковой силы при любом заданном наклоне; это в точности справедливо в бесчисленном множестве случаев. Мы будем также полагать, единственно для удобопонятности нашего чертежа, что эти зоны расположены как бы ступеньками одни поверх других.



Фиг. 29.

Пусть, следовательно, *CHDT* (фиг. 29) есть нумератриса неровностей поверхности *AB*. Мы знаем из наших опытов отношение между ординатами *CH*, *CD* этой кривой; мы знаем, какова форма этой кривой или, если угодно, какова ее природа. Теперь, однако, мы хотим установить ее точную величину или найти ее абсолютные размеры.

Мы начинаем с того, что преобразуем ее в другую кривую *EKC*, соответствующие ординаты которой пропорциональны

квадратным корням ординат первой кривой. Ординаты кривой *EKC* будут служить радиусами только что упомянутых зон; поскольку подобные части этих различных зон относятся как квадраты их радиусов, эти части будут, действительно, пропорциональны ординатам нумератрисы неровностей *CHD*, каковыми они и должны быть, дабы выражать сумму всех маленьких граней с данными наклонами.

Мы не сможем обойтись в этом разделе, подобно тому, как это было в некоторых главах предыдущего раздела, без помощи алгебраического анализа. Все наши читатели знают, что геометрия и алгебра являются как бы логикою истинной физики, и те из них, которые недостаточно искушены в этих глубоких науках, смогут опустить наши вычисления и удовольствоваться обозрением одних результатов.[100] Обозначим через a радиус *AC* поверхности *AB*, которую всегда позволительно выбрать круговою, и через c — ее окружность. Площадь этой поверхности будет равна $\frac{1}{2}ac$. Обозначим через s синусы переменных углов *FCA*, дополнительных к углам наклона маленьких граней; z будет выражать соответствующие ординаты *CH* нумератрисы, находящиеся с s в отношении, известном из наших наблюдений, причем наибольшая величина этого отношения равна полному синусу a; u будет означать ординаты *CK* второй детерминатрисы, равные квадратным корням ординат первой. Наконец, r будет означать длину оси *EC* второй кривой. Ясно, что вся трудность сводится к нахождению абсолютной длины этой оси или ее отношения к *AC* или *DC*, поскольку все остальное будет получаться из этого как следствие.

Поскольку ординаты z первой детерминатрисы *CHDT* пропорциональны квадратам u^2 второй, мы получим $u^2 = \frac{r^2 z}{a}$. Таким образом, мы будем иметь *KC* или $u = r\sqrt{\frac{z}{a}}$. Эта ордината является радиусом маленькой дуги *Kk*, которая, вращаясь вокруг оси *CE*, образует зону, представляющую все маленькие грани с одинаковым наклоном. Мы получим площадь этой зоны,

умножая KL, то есть ее вертикальную высоту, на длину окружности круга с радиусом KC. Что касается до KL, то мы получаем его из пропорции

$$FC = a : FG = ds :: KC = r\sqrt{\frac{z}{a}} : KL = \frac{rds}{a}\sqrt{\frac{z}{a}};$$ 101

и поскольку окружность с радиусом KC равна $KC \times \frac{c}{a}$, или $\frac{cr}{a}\sqrt{\frac{z}{a}}$, мы получим для величины поверхности зоны значение $\frac{cr^2 zds}{a^3}$.

С другой стороны, очевидно, что эта зона занимает на поверхности AB тем меньшую площадь, чем больше угол, образуемый ею с этою поверхностью. Проекция маленькой дуги Kk равна Mm, и она во столько же раз менее, нежели Kk, во сколько $FP = s$ менее полного синуса $FC = a$. Мы получим, следовательно, для полной проекции зоны или для части поверхности AB, служащей ей основанием, величину $\frac{cr^2 zsds}{a^4}$.

Однако, поскольку нам известно отношение между любою из ординат нумератрисы неровностей CHD и синусом $FP = s$, мы можем свести проекцию $\frac{cr^2 zsds}{a^4}$ к одной переменной, что позволит проинтегрировать ее или получить значение величины $\frac{cr^2}{a^4}\int zsds$, то есть суммы оснований всех маленьких граней или неровностей. Но эта сумма должна быть равною площади $\frac{1}{2}ac$ всей поверхности AB, служащей основанием всем маленьким граням или неровностям, коими она покрыта.

Мы получаем, следовательно, уравнение

$$\frac{cr^2}{a^4}\int zsds = \frac{1}{2}ac,$$

из которого мы находим

$$r^2 = \frac{a^5}{2\int zsds};$$

это и есть все, что мы хотели определить.

Найдя значение r или оси CE второй детерминатрисы неровностей, мы получим квадраты ее ординат u или KC столь же очевидным образом:

$$u^2 = \frac{a^4 z}{2\int zsds}.$$

Таким образом, мы будем знать, с какою именно сферою должна сравниваться каждая маленькая грань, имеющая определенный наклон, и вместо того, чтобы иметь, как ранее, простые отношения, мы будем впредь точно вычислять абсолютные количества отраженного света, коль скоро ни одна часть оного не поглощается. Эту последнюю часть мы сможем также определить, сравнивая наши вычисления с непосредственным наблюдением.

Кроме того, если увеличивать поверхность AB, являющуюся кругом с радиусом a, и сделать ее в два или три раза большею, и если даже изменить ее форму, то всегда достаточно будет сделать квадраты r^2 или u^2 также в два или три раза бо́льшими, ибо пропорциональными сумме маленьких граней с любым заданным наклоном будут не просто величины r и u, а их квадраты. Наконец, отраженный свет, если он не претерпевает никакого погашения, будет уменьшаться с удалением, как известно, в том же отношении, в коем квадрат расстояния, на котором он воспринимается, более четверти квадратов r^2 или u^2, поскольку наши маленькие зоны суть не что иное, как части сфер.*

ГЛАВА II

Приложения предыдущего решения к матовым серебряным пластинкам и к гипсовым поверхностям, а также точное определение количества света, поглощаемого этими последними поверхностями

Эти две различные поверхности не слишком отличаются в отношении закона, которому следует производимое ими отражение, и можно почти всегда пренебрегать различиями

* См. главу V первого раздела этой книги.

в нумератрисах неровностей, проявляющимися, главным образом, в нижней части оных, ибо эта нижняя часть отвечает маленьким граням, образующим весьма большие углы с поверхностью AB (фиг. 29), и такое их расположение является причиною тому, что они занимают много меньше места. Тем не менее, мы полагали необходимым не смешивать эти два рода поверхностей и решили провести вычисления для них совершенно различным образом.[102]

Мы помним, что для матового серебра нумератриса неровностей не слишком отличается от двух дуг окружности, имеющих каждая по 114° и обладающих общею хордою DC. Это важное наблюдение позволит нам безупречным образом проинтегрировать наши общие формулы для случая этих пластинок, в то время как в большинстве других случаев интегрирование может быть осуществлено лишь приближенно. Я провожу из точки C касательную CQ к одной из дуг DHC, DTC. Я обозначаю через e синус QS и через f косинус CS или DV. Кроме того, я провожу FR перпендикулярно к QC и обозначаю через x этот перпендикуляр или этот переменный синус.

Тригонометрия учит нас, что синус FP суммы двух дуг AQ и FQ равен $\frac{fx + e\sqrt{a^2 - x^2}}{a}$. Это выражение является выражением для FP, обозначенным в нашем уравнении через s. С другой стороны, поскольку хорды $HC = z$ всегда пропорциональны синусам $FR = x$ в этом частном исследовании, в котором идет речь об отражении, создаваемом матовыми серебряными пластинками или поверхностью гипса, мы получим пропорцию

$$DV = f : DC = a :: FR = x : HC = z = \frac{ax}{f}.$$ [101]

Таким образом, мы имеем все необходимое, чтобы произвести подстановки в нашу общую формулу

$$r^2 = \frac{a^5}{2\int zsds}$$

или

$$u^2 = \frac{a^4 z}{2\int zsds}.$$

Введя $\frac{ax}{f}$ вместо z, $\frac{fx + e\sqrt{a^2 - x^2}}{a}$ вместо s и $\frac{fdx\sqrt{a^2 - x^2} - exdx}{a\sqrt{a^2 - x^2}}$ вместо ds, мы получим

$$r^2 = \frac{a^5}{2\int \frac{fdx\sqrt{a^2 - x^2} - exdx}{a\sqrt{a^2 - x^2}} \quad \left(x^2 + \frac{ex}{f}\sqrt{a^2 - x^2}\right)},$$

что, после интегрирования, переходит в уравнение

$$r^2 = \frac{\frac{3}{2}a^6 f}{(f^2 - e^2)x^3 + 2efx^2\sqrt{a^2 - x^2} + a^2 ef\sqrt{a^2 - x^2} - a^3 ef}.$$

Остается лишь подставить $DV = f$ для наибольшего значения x и $VC = e$ для наибольщего значения $\sqrt{a^2 - x^2}$, и мы получим, наконец,

$$r^2 = \frac{\frac{3}{2}a^6}{a^2 e^2 + e^2 f^2 + f^4 - a^3 e}$$

и

$$r^2 = \frac{3a^3}{2a - 2e} \text{ или } r = a\sqrt{\frac{3a}{2a - 2e}}.$$

Таким образом, мы видим, что ось CE второй детерминатрисы CKE неровностей матового серебра или радиус маленьких граней, параллельных поверхности AB, существенно более радиуса CA или CD этой же поверхности. Он не равен ему, также как в том случае, когда маленькие шероховатости равноценны маленьким полусферам, ибо наклонные маленькие грани являются здесь меньшими или присутствуют в меньшем числе, что увеличивает долю других граней, поскольку все пространство, незанятое одними, должно быть необходимым образом занято другими. Поскольку дуги DHC и DTC равны 114° каждая, угол DCQ равен 57°, а угол ACQ, синусом и косинусом которого являются e и f, равен 33°, то мы получим, что CE равно 1815 частям сравнительно с 1000 ча-

стей для CD. Стало быть, если речь идет об отражении, происходящем перпендикулярно поверхности AB, то мы можем пользоваться впредь пропорцией, о которой мы уже столько раз говорили. Беря квадрат половины CE, мы будем сравнивать его с квадратом расстояния, на котором воспринимается отраженный свет, и найдем, насколько этот свет ослабляется при отражении, предполагая, что никакая часть света не поглощается.

Что касается до гипса, то я счел более благоразумным не приписывать определенной геометрической кривизны нумератрисе неровностей, а позаимствовать из таблицы, помещенной в главе III третьего раздела, значения z или отношения, существующие между незаметными маленькими гранями, и ввести их непосредственно в наши формулы

$$r^2 = \frac{a^5}{2\int zsds}$$

и

$$u^2 = \frac{a^4 z}{2\int zsds}.$$

Затем я искал приближенные значения этих интегралов и притом не только для гипса, но и для голландской бумаги. Нижеследующая таблица содержит небольшое число результатов, вычислением которых я ограничился.

Эти величины суть квадраты радиусов сферических зон, совершенно равноценных маленьким граням, коими обладают неровности поверхностей гипса и голландской бумаги. Таким образом, теперь остается лишь составить простую пропорцию, в согласии с тем, что было установлено в первом разделе этой книги, дабы получить количество света, отражаемого этими поверхностями на расстояние D; это расстояние будет выражаться в частях, коих радиус круговой поверхности AB содержит 100, и пропорция будет гласить: квадрат D^2 относится к интенсивности света, получаемого поверхностью, как четверть значения CK^2, указанного в табличке, относится к интенсив-

ности света, отражаемого на расстояние D. Следует, однако, кроме того, всегда учитывать угол падения, если лучи падают на маленькие грани, производящие отражение, не перпендикулярно.

Таблица значений $\frac{a^4 z}{2 \int zsds}$ или ординат CK на фиг. 29, возведенных в квадрат, четверть которого выражает количества света, отражаемого гипсом и голландскою бумагою, в предположении, что нет никакого погашения лучей.

Углы, образуемые маленькими гранями с большою поверхностью (в градусах)	Значения CK^2 или r^2, или u^2	
	для гипса	для голландской бумаги
0	24875	21765
15	18308	20396
30	13781	11862
45	9303	7792
60	4378	3613
75	1244	1132

Если, следуя этому правилу, найти, какое количество света отражает гипсовый диск диаметром в один дюйм на расстояние в 3 дюйма в перпендикулярном направлении, когда он освещен также в перпендикулярном направлении, то окажется, что этот свет составляет лишь одну 58-ю часть, а не одну 144-ю, как то следовало бы в случае, если маленькие выпуклости были бы равноценны маленьким полусферам.[103] Правда, если падение происходит не под прямым углом, а под углом в 75°, то следует, как мы только что говорили, несколько уменьшить эту 58-ю часть, согласно отношению синусов падения; однако разница будет невелика. Если принять во внимание все обстоятельства, то окажется, что гипс сможет отражать приблизительно одну 60-ю часть получаемого им света; эта величина,

однако, весьма отлична от той, которую нам дает опыт, ибо мы наблюдали, что в действительности отражается лишь одна 149-я или одна 150-я часть падающего света. Отсюда следует, что гипс, несмотря на свою чрезвычайную белизну, поглощает или гасит большое число лучей. Из 10 000 падающих на него лучей должно быть 166 или 167 отраженных, а в действительности их всего лишь 67. Следовательно, из 167 лучей оказываются погашенными 100 или, примерно, три пятых.

ГЛАВА III

Приложение общего решения из главы I к нумератрисе неровностей, наиболее подходящей для большинства планет

Мы видели, что нумератриса неровностей для многих планет не может быть столь узкой, как нумератриса неровностей для нашего гипса, и что в случае этих небесных тел следует придать ей ширину, превосходящую ширину круга. Обозначая попрежнему через a полный синус, а через s — косинус наклонов маленьких граней или синус углов ACH, ACG (фиг. 21), мы возьмем, подобно тому, как мы уже делали ранее, в качестве ординат z нумератрисы количества $s+b\left(\frac{s}{a}\right)^m$; совершая затем необходимые подстановки в наши общие формулы

$$r^2=\frac{a^5}{2\int zsds}$$

и

$$u^2=\frac{a^4 z}{2\int zsds},$$

дающие нам квадраты оси $CE=r$ второй детерминатрисы неровностей $CKEN$ (фиг. 29) и ее переменной ординаты $CK=u$ мы получим величины

$$r^2=\frac{3a^3}{2a+\frac{6}{m+2}b}$$

и

$$u^2 = \frac{3a^2 s + 3a^2 b \left(\frac{s}{a}\right)^m}{2a + \frac{6}{m+2} b},$$

определяющие сферы, поверхности коих способны выразить все маленькие выпуклости наблюдаемых частей планеты.[104]

Если предположить, что возможно рассматривать величину, добавляемую к синусам s углов наклона маленьких граней, совершенно постоянною, как можно думать, по крайней мере, на основании наблюдений, сделанных до сих пор, то показатель степени m будет равен нулю и, поскольку ординаты z нумератрисы пропорциональны $s + b$, мы получим для второй детерминатрисы

$$r^2 = \frac{3a^3}{2a + 3b}$$

и

$$u^2 = \frac{3a^2 b + 3a^2 s}{2a + 3b}.$$

ГЛАВА IV

О полном свете, отражаемом нам планетами в их различных фазах

Существует весьма много изысканий о свете планет. Мы уже рассматривали в предыдущем разделе, насколько одни точки диска этих небесных тел светят более других, когда эти небесные тела не имеют пятен. Можно также спросить, каково отношение, в котором находится их полный свет в их различных фазах. Мы постараемся дать ответ на этот второй вопрос.

Фиг. 27 изображает планету, освещаемую Солнцем в направлении LE, в то время как наблюдатель расположен в EO на расстоянии, которое можно считать бесконечным.[105] Мы не будем повторять всего того, что уже было сказано в пояснение этой фигуры, и не будем входить ни в какие подробности,

касающиеся способа нахождения ES и ET. Обозначим через a радиус шара, через y — синус CR дуги CQ, точка C которой лежит выше или ниже плоскости GMK, через t — синус QZ угла, образуемого QE с линиею EP, делящей пополам угол, который лучи падающего света составляют со зрительными лучами, и, наконец, через g — синус половины этого последнего угла. Тогда мы получим

$$ES = \frac{\sqrt{a^2 - y^2}\,\sqrt{a^2 - t^2}}{a}$$

и

$$ET = \frac{\sqrt{a^2 - g^2}\,\sqrt{a^2 - t^2}\,\sqrt{a^2 - y^2} - gt\,\sqrt{a^2 - y^2}}{a^2}.$$

Первая из этих величин есть синус угла, дополнительного к углу наклона маленьких граней, создающих в нашем случае отражение света в окрестности C, а другая величина ET есть синус угла ECT, равного углу, образуемому зрительными лучами, или, выражаясь лучше, отраженными лучами, с поверхностью планеты в той же точке, поскольку CT перпендикулярна к этим лучам, подобно тому как EC перпендикулярна к поверхности сферы.

Если мы вообразим себе теперь рядом с четвертью круга FQ другую четверть круга Fq, бесконечно близкую к первой, то мы получим для маленькой дуги Qq значение $\frac{adt}{\sqrt{a^2 - t^2}}$, и для того чтобы найти маленькую трапецию, заключенную на поверхности планеты между двумя четвертями круга FQ и Fq и имеющую своею наклонною высотою маленькую дугу Cx, нам надлежит, согласно учению Архимеда, умножить маленькую дугу Qq на $Cx = dy$. Мы получим тогда для этой маленькой трапеции величину $\frac{adydt}{\sqrt{a^2 - t^2}}$, и нам останется найти число маленьких граней, содержащихся в трапеции и вносящих, в соответствии с их размерами, свою долю в отражение, или, что сводится к тому же, мы должны найти радиус маленькой сферы, которую можно уподобить трапеции.

Строго говоря, мы можем удовлетвориться умножением маленькой сферической поверхности $\frac{adydt}{\sqrt{a^2-t^2}}$, отвечающей Cx, на $ES+b\left(\frac{ES}{EK}\right)^m$ или на величину

$$\frac{\sqrt{a^2-y^2}\ \sqrt{a^2-t^2}}{a}+\frac{b\,(a^2-y^2)^{\frac{1}{2}m}\,(a^2-t^2)^{\frac{1}{2}m}}{a^{2m}},$$

которая, будучи синусом ES угла BCH, увеличенным на некоторую величину $b\left(\frac{ES}{EK}\right)^m$, выражает сумму маленьких граней, имеющих равные углы наклона, дополнением которых является BCH.[106] Это дает для отношения между полными количествами света то же самое, что и умножение ординат второй детерминатрисы на четверть квадрата u^2, поскольку эти квадраты пропорциональны ординатам z нумератрисы. Мы получаем, следовательно, для суммы маленьких граней, коим удается в данном случае участвовать в отражении света, выражение

$$dydt\sqrt{a^2-y^2}+\frac{bdydt\,(a^2-y^2)^{\frac{1}{2}m}\,(a^2-t^2)^{\frac{1}{2}m-\frac{1}{2}}}{a^{2m-1}};$$

это выражение надлежит изменить, уменьшив его в том же отношении, в коем синус угла падения прямого света менее полного синуса. Иными словами, только что найденное выражение следует разделить на полный синус a и умножить на синус угла падения, равный $\sqrt{a^2-g^2}$, ибо, поскольку CH параллельна PE и перпендикулярна маленьким граням, угол падения является дополнением угла NEP, синус коего равен g. Мы получаем, следовательно, для количества света, отсылаемого нам каждою маленькою элементарною трапецией $\frac{adtdy}{\sqrt{a^2-y^2}}$ на поверхности планеты, выражение

$$\frac{dtdy\sqrt{a^2-y^2}\ \sqrt{a^2-g^2}}{a}+\frac{bdtdy\,(a^2-y^2)^{\frac{1}{2}m}\,(a^2-t^2)^{\frac{1}{2}m-\frac{1}{2}}\sqrt{a^2-g^2}}{a^{2m}}.$$

Однако этот свет является сам по себе элементарным количеством, и очевидно, что его надлежит проинтегрировать два раза, поскольку он, вследствие малости трапеции, является бесконечно малою величиною второго порядка. Интегрирование первого члена связано с квадратурою круга; интегрирование второго также может быть связано с нею, но может оказаться и гораздо более сложным; в некоторых случаях интегрирование этого второго члена может быть доведено до конца. Мы не будем углубляться в это исследование, полностью относящееся к геометрии; мы рассмотрим нашу задачу лишь при двух частных предположениях: во-первых, когда $m=0$, и во-вторых, когда $m=2$.

При *первом предположении*, дающем для ординат CH нумератрисы неровностей величину $ES+b$, наш элементарный свет сводится к

$$\frac{dtdy\sqrt{a^2-y^2}\sqrt{a^2-g^2}}{a}+\frac{bdtdy\sqrt{a^2-g^2}}{\sqrt{a^2-t^2}}.$$

Мы будем интегрировать его, считая в начале переменным только y или CR. Если мы обозначим через Q площадь четверти круга с радиусом a, то мы получим для количества света, отражаемого всем маленьким сферическим треугольником QFq, величину

$$\frac{Qdt\sqrt{a^2-g^2}}{a}+\frac{abdt\sqrt{a^2-g^2}}{\sqrt{a^2-t^2}}.$$

Переходя затем ко второму интегрированию, при котором переменными будут синусы t или QZ, мы получим для количества света, отражаемого всею поверхностью планеты, простирающеюся от средней линии EW до края диска FK, величину

$$\frac{\sqrt{a^2-g^2}\,Q\,\mathrm{Sin}\,KW}{a}+b\sqrt{a^2-g^2}\,KW.$$

Мы получим, кроме того, другую такую же величину для света, отражаемого всею поверхностью, простирающеюся от

средней линии EW в другую сторону до границы света и тени. Таким образом, вся освещенная часть, лежащая как выше плоскости GMK, так и ниже оной, будет посылать нам количество света, выражаемое формулою

$$\frac{4Q\sqrt{a^2-g^2}\,\mathrm{Sin}\,KW}{a}+4b\sqrt{a^2-g^2}\,KW;$$

эта формула является общею для всех фаз планеты, если исходить из первого предположения.

Если планета находится в своих противостояниях, то угол MEW обратится в нуль; g также исчезнет, и мы получим для полного света $4aQ+8bQ$; если же планета находится в своих четвертях, то угол MEW будет, как и угол NEW, равен $45°$, и мы получим $2aQ+2\sqrt{2}\;bQ$. Таким образом, свет, воспринимаемый нами в противостоянии, относится к свету, воспринимаемому нами в четвертях, как $2a+4b$ относится к $a+b\sqrt{2}$, и имеет во втором случае меньше половины той силы, коей он обладает в первом.

При *втором предположении*, или когда $m=2$, мы имеем для ординат CH нумератрисы неровностей[107]

$$ES+b\left(\frac{ES}{EK}\right)^2$$

и наш элементарный свет

$$\frac{dtdy\sqrt{a^2-y^2}\,\sqrt{a^2-g^2}}{a}+\frac{bdtdy\,(a^2-y^2)^{\frac{1}{2}m}\,(a^2-t^2)^{\frac{1}{2}m-\frac{1}{2}}\,\sqrt{a^2-g^2}}{a^{2m}}$$

сведется к

$$\frac{dtdy\,\sqrt{a^2-y^2}\,\sqrt{a^2-g}^{\,2}}{a}+\frac{bdt\,\sqrt{a^2-g^2}\,\sqrt{a^2-t^2}\,(a^2\,dy-y^2\,dy)}{a^4}.$$

Первое интегрирование дает

$$\frac{dt\,\sqrt{a^2-g^2}\;Q}{a}+\frac{2}{3}\,\frac{bdt\,\sqrt{a^2-t^2}\,\sqrt{o^2-g^2}}{a},$$

а второе

$$Q\frac{\sqrt{a^2-g^2}}{a}\,\mathrm{Sin}\,KW + \frac{1}{3}\,b\,\sqrt{a^2-g^2}\left(\frac{a\cdot KW+\mathrm{Sin}\,KW\cdot\mathrm{Sin}\,MW}{a}\right).$$

Этот интеграл выражает свет лишь для одной части поверхности, расположенной с одной стороны от EW, и его следует учетверить, дабы учесть также и те части, кои расположены под плоскостью GMK. Иначе говоря, мы получим для всего вместе формулу

$$\frac{4Q\sqrt{a^2-g^2}\,\mathrm{Sin}\,KW}{a}+\frac{4}{3}\,\frac{b\sqrt{a^2-g^2}}{a}\,(a\cdot KW+\mathrm{Sin}\,KW\cdot\mathrm{Sin}\,MW),$$

выражающую, стало быть, весь свет, отражаемый нам освещенною частью планеты во всех ее различных фазах.

Это выражение сводится к $4aQ+\frac{8}{3}\,a^2b$ при противостояниях и к $2aQ+\frac{2+\sqrt{2}}{3}\,a^2b$ в четвертях.[108] Таким образом, планета освещает нас в четвертях относительно менее, нежели в противостояниях; как при одном, так и при другом предположениях она теряет более половины своего света, переходя из противостояний в четверти, ибо $2aQ+\frac{2+\sqrt{2}}{3}\,a^2b$ менее половины $4aQ+\frac{8}{3}\,a^2b$, подобно тому, как при первом предположении $a+b\sqrt{2}$ была менее половины $2a+4b$. Кроме того, я не думаю, чтобы было возможным сделать выбор между тем и другим предположением с помощью наблюдений, сделанных над Луною, вследствие множества пятен на этой планете; вероятно можно достигнуть успеха, производя наблюдения над Венерою.

Однако нам известны всегда лишь отношения между полными светами; мы никогда не знаем интересующего нас абсолютного значения этих светов или, что сводится к тому же, нам всегда недоступно отношение этих светов к свету, получаемому планетою. Правда, нам достаточно найти последнее отношение для какой-либо одной фазы и лишь изменить про-

порционально все предыдущие результаты. Нам остается, следовательно, дать строгое решение задачи для противостояний, остановив, естественно, свой выбор на последних.

ГЛАВА V

Найти, какую часть света, получаемого от Солнца, возвращают нам планеты, находясь в противостоянии, если считать, что ни один луч не погашается

В этом новом исследовании мы вернемся к формуле, найденной нами в конце первой главы этого раздела. Мы видели, что если a и c суть радиус и окружность круговой поверхности AB (фиг. 29), то мы имеем для всех радиусов u (или CK) сфер, равноценных маленьким граням наших выпуклостей, общее выражение

$$u^2 = \frac{a^4 z}{2\int zsds},$$

в котором s означает косинусы FP углов наклона маленьких граней, а z — ординаты HC нумератрисы или сумму всех маленьких граней, имеющих одинаковый наклон.

Предположив это, мы будем рассматривать шар ADB на фиг. 13 как планету, освещенную лучами Солнца, параллельными KD, и рассматриваемую наблюдателем, расположенным на том же направлении. Мы представим себе затем поверхность планеты как бы разделенною на бесконечное множество зон, образованных вращением маленьких дуг Ee вокруг оси CD. Каждая зона являет Солнцу и наблюдателю маленькие грани, имеющие в точности одинаковый наклон, и отражение, также как и падение, будет перпендикулярным. Дополнение к углу наклона маленьких граней будет выражаться дугою AE; мы получим, следовательно, для косинуса s величину FE. Для площади каждой зоны мы получим при этом cds, и нам останется лишь составить нижеследующую про-

порцию, дабы найти радиус сферы, которой наша зона равноценна в отношении отражения. Площадь $\frac{1}{2}ac$ относится к $u^2 = \frac{a^4 z}{2\int zsds}$, как cds к $\frac{a^3 zsds}{\int zsds}$; этот четвертый член пропорции будет квадратом радиуса бесконечно малой сферы, способной произвести то же действие, что и маленькие грани зоны cds. Этот квадрат пропорционален сумме маленких граней, проявляющих свое действие в данном случае; он является одним из членов пропорции, которой мы пользуемся, начиная с первого раздела этой второй книги. Этот квадрат или, вернее, четверть его выражает собою свет, отражаемый всею зоною в целом, и является непосредственною составною частью полного света. Мы не должны делать более никаких приведений, ибо падение является перпендикулярным. Мы интегрируем и получаем следующее: u^2 или, вернее,

$$r^2 = \frac{a^3 \int zds}{\int zsds}$$

является совершенно общим выражением квадрата радиуса сферы, которая, будучи абсолютно гладкою, отражает в точности тот же свет, что и планета в ее противостояниях.

Если, желая найти какое-либо применение этой формуле, мы предположим, что ординаты нумератрисы равны $s + b\left(\frac{s}{a}\right)^m$ или, иными словами, пропорциональна хордам круга $ChDg$ на фиг. 21, на стр. 138, увеличенным на количество $b\left(\frac{s}{a}\right)^m$, то мы найдем с помощью подстановок и интегрирования для квадрата радиуса сферы, имеющей гладкую поверхность и оказывающей то же действие, что и планета, величину

$$\frac{a^3 + \frac{2}{m+1} a^2 b}{\frac{2}{3} a + \frac{2}{m+2} b}.$$

Если мы обозначим через D расстояние, на котором воспринимается отраженный свет, то нам останется лишь составить следующую пропорцию: D^2 относится к силе света на планете, как четверть от

$$\frac{a^3+\frac{2}{m+1}a^2 b}{\frac{4}{3}a+\frac{2}{m+2}b}$$

к силе света, отражаемого ею в ее противостоянии.

Мы ограничимся единственным случаем, впрочем, быть может, достаточно общим, при котором $m=0$, что превращает выражение $s+b\left(\frac{s}{a}\right)^m$ для z в $s+b$. Мы получаем, следовательно, для отраженного света выражение

$$\frac{a^3+2a^2 b}{\frac{8}{3}a+4b},$$

переходящее в $\frac{3}{8}a^2$ или $\frac{1}{2}a^2$, смотря по тому, положить ли постоянную b равной нулю или бесконечной; при этом, если бы планета была совершенно гладкою, она отсылала бы нам количество света, равное $\frac{1}{4}a^2$.

Таким образом, маленькие выпуклости являются причиною того, что планета посылает нам более сильный свет. Здесь, однако, нет абсолютного максимума: общее выражение

$$\frac{a^3\int zds}{4\int zsds}$$

его не имеет; чем более яркою является, при прочих равных обстоятельствах, планета по краям, тем большее количество света она должна нам посылать. Как бы то ни было, громадное изменение в величине b приводит к изменению света

лишь в отношении 3 к 4. В случае $b=0$, то есть когда нумератриса неровностей совершенно подобна кругу $CgDh$ на фиг. 21, свет, получаемый нами от Луны, должен составлять приблизительно одну 127 600-ю часть света Солнца; если же постоянная b, прибавляемая к хордам или ординатам круга, бесконечна, то этот свет должен составлять одну 95 900-ю часть. Эти значения получаются для $\frac{3}{8}a^2$ и $\frac{1}{2}a^2$, в то время как значение, равное одной 191 700-й или 191 800-й, соответствует величине $\frac{1}{4}a^2$, то есть случаю, когда поверхность планеты является совершенно гладкою.* Все уменьшения, наблюдаемые на опыте, должны быть, следовательно, приписаны погашению света и действию пятен. Из 300 000 лучей поглощаются, по меньшей мере, 172 000 или, быть может, 204 100.

ГЛАВА VI

Первое пояснение. Отражают ли маленькие неровности получаемые ими параллельные лучи параллельными или же они отражают их подобно выпуклым поверхностям?

Мы не преминем, перед окончанием этой второй книги, устранить некоторые трудности, которые могут возникнуть вполне естественным образом. Мы рассматривали сначала грани неровностей как маленькие плоскости; можем ли мы, однако, затем уподобить их выпуклой поверхности сферы с бо́льшим или меньшим радиусом? Мне представляется вполне очевидным, что так и следует поступить, по крайней мере в отношении всех тел, интенсивность цвета которых не изменяется при рассматривании оных с различных сторон. Откуда бы мы их ни рассматривали, свет, посылаемый каждою точкою этих тел,

---

* См. главу VII первого раздела второй книги.

исходит от многих маленьких граней. Очевидно, однако, что не все они имеют в точности одинаковое положение и что их совокупность должна образовать как бы кривую поверхность. Таким образом, каждая заметная часть предмета действует наподобие выпуклой поверхности и становится как бы светящею точкою, вследствие расхождения, придаваемого ею лучам.

Иное получится, если неровности светящего тела образуют маленькие волны или параллельные между собою бороздки; пример тому мы имели во многих поверхностях, являемых нам природою и самим искусством. Для этих поверхностей следовало бы изменить установленные нами правила, однако мы всегда предполагали и, кажется, даже нарочно упоминали, что мы изучаем лишь те поверхности, маленькие неровности которых вызывают одни и те же явления, с какой бы стороны мы ни наблюдали поверхность, лишь бы под одинаковым наклоном.

Однако если совокупность маленьких граней, весьма мало различающихся в своем положении друг от друга и участвующих в одном и том же отражении, сравнима с выпуклою поверхностью сферы, то почему мы принимаем во внимание синус угла падения лучей, тогда как в наших исследованиях о свете, отражаемом сферическими поверхностями, изложенном в первом разделе, мы не вводили этого синуса? Я отвечаю на это, что принять здесь во внимание это дополнительное обстоятельство я был вынужден силою опыта. Поскольку я заботился о том, чтобы основываться во всем на наблюдении, я убедился, что я не могу не рассматривать падение света под меньшим углом, как одну из причин ослабления оного; в этом весьма легко убедиться.

Осветив матовую поверхность под углом наклона в 50 или 60° и рассматривая ее с противоположной стороны под тем же наклоном, мы уменьшим затем каждый из этих углов, сделав их равными 20 или 25°. Яркость поверх-

ности увеличится примерно вдвое, если угол падения не вызовет уменьшения, способного ослабить эту возросшую яркость и свести ее к существенно той же величине. Действительно, отражение происходит при этом всегда на одних и тех же маленьких гранях, параллельных большой поверхности, и чем более наклонно мы смотрим на последнюю, тем более ярким представляется нам ее цвет, ибо, как уже отмечалось множество раз, свет, посылаемый ею, падает на меньший участок сетчатки. Необходимо, следовательно, чтобы одновременно с увеличением интенсивности света предмета вследствие наклонности зрительных лучей происходило ослабление оного в том же отношении вследствие меньшего угла наклона падающих лучей и чтобы это уравнивание было достаточно точным, ибо интенсивность цвета не меняется заметным образом. Я не ограничился проверкою этого в отношении маленьких граней, параллельных большой поверхности, но делал опыты также и с теми, которые были налонены.

Я полагаю, что я уразумел, в конце концов, причину этого явления, на которое меня натолкнули наблюдения. Каждая маленькая грань, взятая в отдельности, является чрезвычайно неровной. Об этом можно судить по частям, еще доступным наблюдению, которые мы можем различать в наши наилучшие микроскопы. Почти вся поверхность является нарушенною и состоит из маленьких пустот рядом с маленькими выступающими частями. Эти неровности образуют мнимые крошечные грани, о которых шла речь; одни из них являются в действительности вогнутыми, а другие выпуклыми; однако, приписывая им некие средние свойства, мы считаем их как бы плоскими, и не следует удивляться тому, что число лучей, получаемое каждою из них в отдельности, пропорционально синусу падения. Однако мы рассматриваем их как плоские лишь в отношении получаемых ими лучей, ибо, поскольку многие из них, имеющие небольшое различие в расположении, действуют совокупным образом, лучи исходят

всегда как бы из действительного или мнимого фокуса и распространяются, удаляясь друг от друга вследствие своего расхождения.

ГЛАВА VII

Второе пояснение. Спрашивается, что делается с лучами, отражаемыми от одной маленькой неровности на другую?

Некоторые лучи отражаются дважды, отсылаясь одною маленькою неровностью на другую. Часть из них направляется затем к глазу и усиливает впечатление, производимое прочими; чаще всего, однако, действие их оказывается незначительным, и они нередко теряются для наблюдателя. Дабы сделать это явление более доступным расчету, я предположил, что плоская поверхность покрыта маленькими выпуклостями, совершенно равноценными полусферам, и что она освещена и рассматривается в перпендикулярном направлении.

Если обозначить единицею свет, отражаемый вершинами этих маленьких полусфер, то для света, отраженного два раза и посылаемого в глаз сторонами шести маленьких соседних полусфер, мы получим величину $\frac{3}{8-2\sqrt{2}}$. Шесть других маленьких полусфер, удаленных еще более, отражают количества света, равные $\frac{3}{72-2\sqrt{6}}$, что дает вместо основного света, равного 1, общее количество света, равное, приблизительно, $1\frac{37}{50}$. Как видно, избыток очень велик. Однако здесь мы сталкиваемся с огромным различием между физическим и чисто геометрическим, причем почти все это различие приходится на второе и третье отражения.

Во-первых, мы предполагаем, что маленькие выпуклости равноценны маленьким полусферам, однако в природе, быть может, и не существует тел, имеющих подобные выпуклости.

Все исследованные нами земные тела имеют значительно меньше наклонных маленьких граней, нежели тех, кои параллельны большим поверхностям, и притом, быть может, на половину или даже на две трети. Таким образом, можно думать, не опасаясь впасть в преувеличение, что избыток в $\frac{37}{50}$ сводится, по крайней мере для начала, к 20 или 25 пятидесятым.

Во-вторых, маленькие грани, производящие вторичные отражения, наклонены под углом в 45°, и, поскольку согласно физике сила света следует отношению синусов падения и это отношение берется дважды, избыток в $\frac{20}{50}$ или $\frac{25}{50}$ становится в два раза меньшим, составляя $\frac{1}{5}$ или $\frac{1}{4}$.

В-третьих, для того чтобы действие вторичных отражений могло проявиться, необходимо, чтобы две маленькие грани соседних выпуклостей, имеющие одинаковый наклон в 45°, согласовывались друг с другом с величайшей точностью. Это условие выполняется весьма редко, ввиду крайней неупорядоченности, нераздельно связанной со всем физическим. Эта неупорядоченность не меняет ничего в отношении отражения, производимого вершинами этих маленьких выпуклостей; если маленькая грань, производящая это отражение, не лежит в самой высокой точке, то рядом всегда найдется другая, которая сможет выполнить ее роль. Однако успешность этих двух отражений зависит от двух или большего числа обстоятельств, выполняющихся одновременно лишь весьма редко. Если эти две маленькие грани, передающие друг другу свет, имеют подходящие наклоны, то они все же могут оказаться повернутыми немного различным образом; наоборот, при выполнении этого второго условия может не быть осуществлено первое. Это удачное совпадение столь деликатных обстоятельств должно быть весьма редким, а посему, не говоря уже о том, что свет, претерпевший несколько отражений, обычно очень

ослаблен, он нередко также теряется для наблюдателя вследствие того, что он направляется по иному пути, нежели свет, отраженный лишь однажды. Значительная часть света, претерпевающего два отражения, углубляется в промежутки между маленькими выпуклостями и, внедряясь в тело, тратится, главным образом, на его нагревание.

КНИГА ТРЕТЬЯ



ИЗЫСКАНИЯ О ПРОЗРАЧНОСТИ И НЕПРОЗРАЧНОСТИ ТЕЛ





Мы видели, что, входя в прозрачное тело, свет частично возвращается назад вследствие отражения и что часть, проходящая внутрь и выходящая с противоположной стороны, вновь разделяется благодаря новому отражению; в то же время многие лучи ослабляются или угасают, что в свой черед приводит к еще большей убыли света. Однако, помимо этих трех весьма заметных изменений, свет претерпевает еще и четвертое изменение, которое может подчас оказаться весьма большим, когда длина пути света в прозрачном теле велика. На первых трех изменениях толща среды не сказывается: они обусловлены лишь тем, что свет встречает на своем пути две поверхности, в то время как изменение, о котором идет речь, проистекает от препятствий, чинимых внутренними частями прозрачного тела, становящегося непрозрачным в большой толще. Мы должны, стало быть, исследовать соотношение между этим ослаблением света и длиною пути, который он проходит в среде.



РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

О ЗАКОНЕ, КОТОРОМУ ПОДЧИНЕНЫ ИЗМЕНЕНИЯ СВЕТА, ПРОХОДЯЩЕГО СКВОЗЬ РАЗЛИЧНЫЕ ТОЛЩИ ПРОЗРАЧНОГО ТЕЛА

ГЛАВА I

О том, что свет, проходя однородные и одинаково толстые слои прозрачного тела, не уменьшается согласно членам арифметической прогрессии[87]

Первое суждение, которое можно высказать об этом предмете, заключается в том, что если представить себе прозрачное тело разделенным на слои одинаковой толщины, то все эти слои будут задерживать одинаковые количества лучей, и это приведет к тому, что свет, претерпевая при прохождении через каждый слой в точности одинаковое уменьшение, будет убывать в арифметической прогрессии, подобно тому, как уменьшаются ординаты треугольника.

Дабы установить истинность или ложность этого суждения, которого придерживался парижский капуцин Франсуа Мари, уже упоминавшийся в первой книге, а также некоторые другие авторы, заблуждения которых менее простительны, я заставлял проходить свет силою в 32 свечи перпендикулярно через два куска стекла, и он становился при этом в два раза более слабым, ибо он казался мне равным свету, испускаемому 16 свечами. Если бы последующее прибавление двух кусков стекла такой же толщины вызывало бы такое же ослабление, то оче-

видно, что были бы задержаны все лучи; нечего уже и говорить о том, что восемь или девять кусков стекла образовали бы совершенно непроницаемую для света толщу. Однако, добавляя к двум первым кускам два другие, я отнюдь не получил абсолютно непрозрачного тела; свет остался еще весьма ярким; даже когда я заставлял его проходить через десять кусков, он оставался не слабее, нежели свет одной свечи.

ГЛАВА II

О том, что при возрастании толщин на равные величины свет уменьшается подобно членам геометрической прогрессии

Однако очевидно, что читатели, поразмыслив, поймут, без сомнения, что для того, чтобы вторая толща задерживала в точности то же число лучей, что и первая, необходимо, чтобы в нее входило в точности то же число лучей, что и в первую. Однако, поскольку второй толщи достигает, быть может, лишь треть или четверть общего числа лучей, ибо остальные лучи уже задержаны, то очевидно, что этот слой должен задерживать также в три или четыре раза менее лучей, нежели первый слой. Таким образом, равные слои должны поглощать не равные, а лишь пропорциональные количества лучей. Другими словами, если некоторая толща поглощает половину света, то другая, следующая за первой и тождественная ей, поглощает не всю остальную половину, а лишь половину этой половины, оставляя, следовательно, лишь четверть; поскольку все другие слои поглощают подобные же части, то ясно, что свет будет уменьшаться всегда в геометрической прогрессии.

Ясно также, что сказанное нами должно быть справедливо вне зависимости от того, каким образом свет распространяется через прозрачные тела. Действительно, положим, что лучи могут проходить лишь сквозь поры и что этих пор столь много, что твердые части составляют лишь одну сотую кажущегося внешнего объема тела; если представить себе это тело разде-

ленным на почти бесконечное число слоев, толщина которых равна диаметру этих маленьких твердых частей, то первый слой поглотит лишь сотую часть лучей, и если их было 100 000, то второго слоя достигнут 99 000 лучей. Поскольку во втором слое будет снова в сто раз более пор, нежели твердых частей, ибо тело однородно, то ясно, что после прохождения лучей через второй слой их число снова претерпит уменьшение на одну сотую и окажется равным 98 010. Все другие слои окажут подобное же действие; всякий раз они будут уменьшать свет на одну сотую часть; таким образом, всегда будет в точности соблюдаться геометрическая прогрессия. С другой стороны, если маленькие твердые части, из которых состоят тела, в некоторых случаях сами служат для передачи света, то мы не придем ни к чему новому, ибо эти зерна материи, передающие свет, могут рассматриваться как поры, и мы вполне можем принимать во внимание лишь зерна другого рода, которые отклоняют или ослабляют свет; а так как в каждом слое находится всегда одинаковое количество этих последних, то, очевидно, что они будут всегда ослаблять свет на одну и ту же пропорциональную часть.

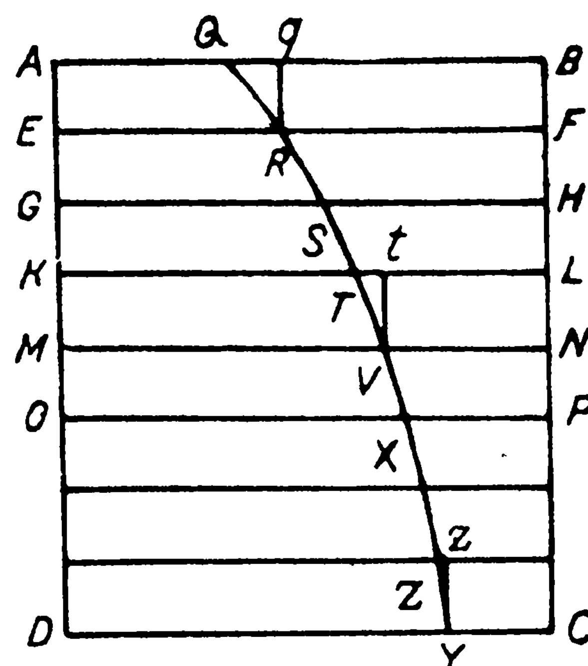
ГЛАВА III

Об использовании логарифмической кривой для представления ослаблений света

Из предыдущего следует, что если предположить светящее тело бесконечно удаленным, дабы лучи его были параллельными и свет уменьшался бы лишь вследствие введения прозрачного тела, а расхождение лучей не играло бы никакой роли, то силы, которыми будет обладать свет после прохождения разных толщин, могут быть представлены ординатами логарифмической кривой, осью которой служит толщина тела. Логарифмическая кривая хорошо известна геометрам: это единственная кривая, все подкасательные которой равны;[109] основное свойство этой кривой заключается в том, что ее

ординаты образуют геометрическую прогрессию, когда ось ее разделена на равные отрезки.

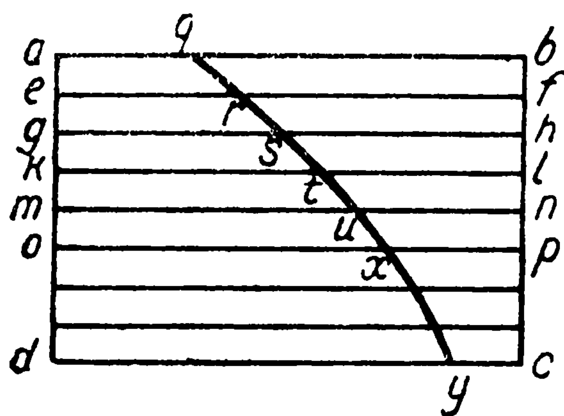
Для того чтобы воспользоваться здесь этой кривой линией, рассмотрим совершенно однородное тело *ABCD* (фиг. 30); разделим его мысленно на множество слоев одинаковой толщины и предположим, что свет входит в него перпендикулярно поверхности *AB*, причем линия *QB* будет выражать количество и силу лучей. Когда свет пройдет толщу *BF* или *AE* и когда он встретится с поверхностью *EF*, многие лучи окажутся задержанными, а многие другие потеряют в яркости, и сила света будет выражаться лишь отрезком *RF*. Если логарифмическая кривая *QRVY* проходит через точки *Q* и *R*, имея своей осью линию *BC*, то можно видеть, что все другие ординаты *SH*, *TL*, *VN* и т. д. будут выражать силу света, дошедшего до *GH*, *KL*, *MN* и т. д., поскольку эти ординаты *SH*, *TL*, *VN* и т. д. уменьшаются, так же как и сила света, на пропорциональные величины. Таким образом, если *VN* составляет половину *QB*, то это означает, что свет, достигающий *MN* и распространяющийся по всей этой поверхности, составляет лишь половину общего света *QB*, входящего в прозрачное тело. Равным образом, если *YC* составляет четверть *QB*, то можно заключить, что свет, доходящий до *DC*, составляет лишь четверть общего света. Словом, все ординаты логарифмической кривой *QVY* будут всегда выражать различные количества света, проходящие через все различные толщи тела.



Фиг. 30.

Можно также видеть, что логарифмическая кривая будет различной и будет приближаться более или менее быстро к своей оси *BC* в зависимости от того, насколько прозрачно тело; или, что сводится к тому же, ординаты, имеющие одинаковую длину, будут находиться на большем или меньшем рас-

стоянии друг от друга вдоль оси. Например, логарифмическая кривая *qruy* (фиг. 31), показывающая уменьшения, которые претерпевает свет, проходя через тело *ac*, и которую по этой причине можно назвать его *градулюцикою*, отличается от логарифмической кривой *QRVY* (фиг. 30), являющейся градулюцикою тела *AC*, лишь тем, что одни и те же ординаты будут расположены у первой кривой в два раза ближе друг к другу, чем у второй; это приводит лишь к тому, что толща *bf* или *ae*, в два раза меньшая, произведет в теле *ac* такое же уменьшение света, что и в два раза большая толща *BF* или *AE* в теле *AC*.



Фиг. 31.

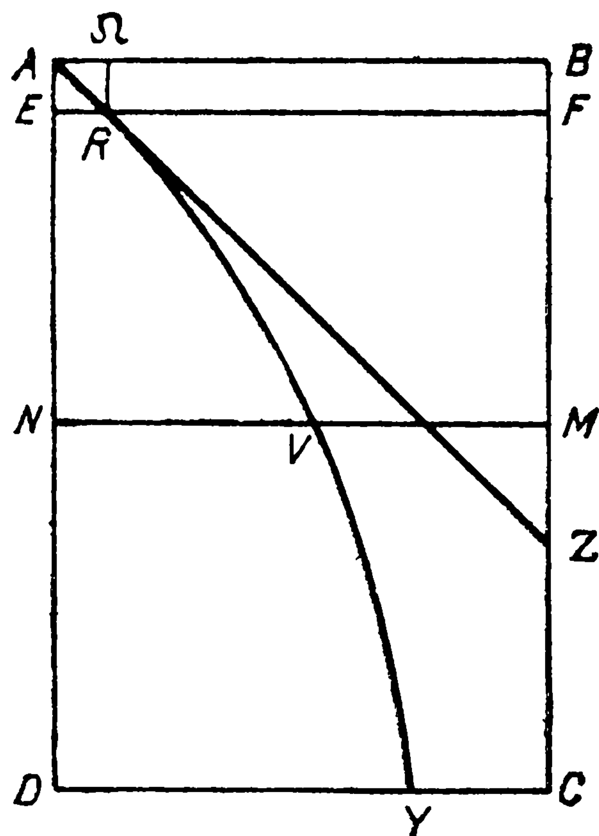
Ясно, что поскольку *bf* в два раза менее, чем *BF*, все другие толщи *fh*, *hl*, *ln*, тела *ac* также должны быть в два раза менее соответствующих толщин *FH*, *HL*, *LN* и т. д. тела *AC*, коль скоро эти последние части равны между собою, так же как и части *fh*, *hl*, *ln* и т. д. Стало быть, если некоторое число частей *fh*, *hl* и т. д. или весь промежуток *bn* сравнивается с тем же числом частей *FH*, *HL* и т. д. или с промежутком *BN*, то первый из этих промежутков будет в два раза менее второго. Это показывает нам, что если взять несколько равных ординат на двух различных логарифмических кривых, то соответствующие части двух осей будут всегда пропорциональны, откуда следует, что для того, чтобы свет уменьшался на равную величину, он должен проникать в двух различных средах на пропорциональные толщи.

ГЛАВА IV

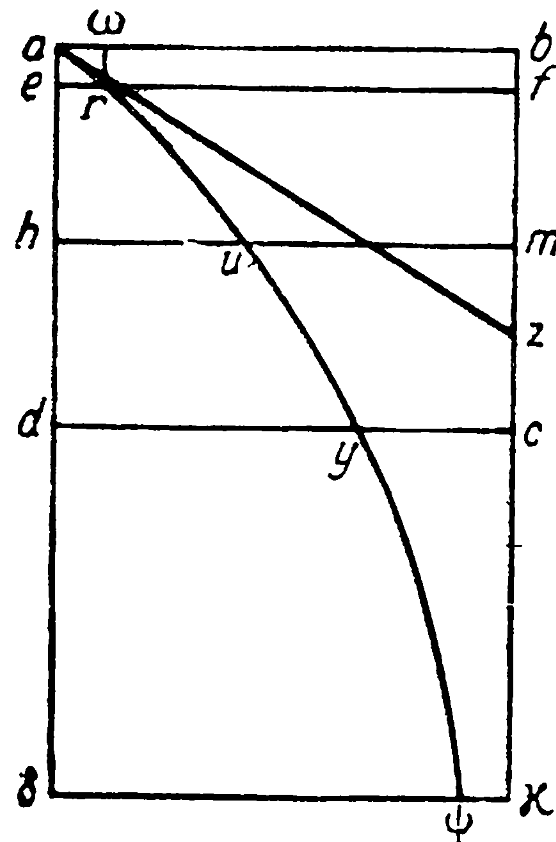
О том, какому закону должна следовать удельная прозрачность сред

Здесь нам представляется случай поставить вопрос, относящийся на первый взгляд к грамматике, но который по сути

дела может быть разрешен лишь геометрами. Речь идет о том, что следует разуметь, когда говорят достаточно общим образом о том, что *некоторая среда более прозрачна, нежели другая, в некоторое число раз*. Обращение к смыслу, придаваемому слову „прозрачность" обычаем, этим верховным судьей языка, нам ничего не даст, ибо до сего времени принято удовлетворяться признанием того, что одни тела прозрачнее других, нимало не заботясь о том, во сколько раз; никто не пытался выразить это соотношение, ибо никто не пытался его



Фиг. 32.



Фиг. 33.

открыть. Если бы речь шла об абсолютной прозрачности двух тел некоторых определенных размеров, то можно было бы, без сомнения, утверждать, что то из них, которое пропускает в два или три раза более лучей, в два или три раза более прозрачно: в этом смысле фарфор в весьма малой толще прозрачнее очень толстого обычного стекла. Иначе обстоит дело, когда речь идет об удельной прозрачности или когда необходимо знать вообще, насколько, например, воздух прозрачнее воды.

В этом случае требуется знать общее соотношение, которое вместо того, чтобы быть пригодным лишь для такой-то и такой-то толщины, будет пригодно для всех толщин; и в этом

случае нельзя будет говорить, что средою в два или три раза более прозрачною будет та, которая, имея ту же толщину, что и другая, пропустит в два или три раза более света. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно рассмотреть две различные логарифмические кривые AVY (фиг. 32) и $auy\psi$ (фиг. 33), ординаты которых выражают различные силы света в каждой точке его пути, когда он проходит перпендикулярно граням AB и ab двух неодинаково прозрачных сред $ABCD$ и $ab\varkappa\delta$. Если толщина BM сделана равною толщине bc, и если о прозрачности судят по силе света, прошедшего эти две толщи, то можно говорить, что новая среда прозрачнее второй в отношении VM к yc; если же взять в два раза большие толщины, BC и $b\varkappa$, то прозрачность будет выражаться отношением YC к $\psi\varkappa$. Однако этого рода отношение удельных прозрачностей отнюдь не является постоянным и общим и пригодным для всех возможных толщин, а непрерывно изменяется, ибо, как известно геометрам, ординаты VM и yc не пропорциональны ординатам YC и $\psi\varkappa$.

В этом изменении отношения можно также очень легко убедиться, придав ординатам AB, VM, YC значения, например, 16, 8 и 4, образующие геометрическую прогрессию, а ординатам ab, yc и $\psi\varkappa$ другие значения, например 16, 4, 1, следующие другой геометрической прогрессии, дабы отметить различие в прозрачности. Ограничиваясь затем рассмотрением лишь ординат VM и yc или количеств света, проходящего первые слои BM и bc, мы видим, что первая среда прозрачнее второй в отношении 8 к 4, то есть в два раза; в то же время, рассматривая ординаты или количества света YC и $\psi\varkappa$, проходящего другие толщины BC и $b\varkappa$, мы придем к отношению, равному четырем;[110] таким образом, беря различные толщины, мы будем каждый раз получать различные отношения.

Нетрудно исследовать подобным же образом все другие способы сравнения удельной прозрачности прозрачных тел; при этом можно убедиться в том, что получаемые отношения будут всегда различными, если только не связывать эту про-

зрачность с большею или меньшею длиною пути, который надлежит пройти свету в различных средах, дабы уменьшить свою силу на одинаковую величину. Иными словами, *веществами в пять или шесть раз более прозрачными будут те, которые вызывают то же ослабление света, будучи взяты в пять или шесть раз более толстыми.* Стало быть, если предположить, что количества света *AB*, *RF*, *VM*, *YC* и т. д. равны количествам *ab*, *rf*, *um*, *yc*, то среда *ABCD* будет прозрачнее среды *abχδ* в отношении *BF* к *bf* или *BM* к *bm*, или же *BC* к *bc*. Ясно, что все эти отношения равны, ибо мы видели, что когда ординаты различных логарифмических кривых равны, отрезки их осей неизменно пропорциональны.

Можно также заметить, что подкасательные *BZ* и *bz* находятся в том же отношении, ибо если рассмотреть две ординаты *ab* и *rf*, бесконечно близкие друг к другу и равные двум ординатам *AB* и *RF*, и провести маленькие линии *rω* и *RΩ*, равные и параллельные *fb* и *FB*, то отношение *AB* к *AΩ* или *ab* к *aω* будет равно отношению подкасательной *BZ* к *RΩ* или к *BF* или подкасательной *bz* к *rω* или к *bf*, откуда следует, что подкасательные *BZ* и *bz* относятся так же, как и малые толщины *BF* и *bf*. Таким образом удельные прозрачности пропорциональны не только толщам, которые свет должен пройти в различных средах, дабы уменьшиться на одинаковые величины, но также и подкасательным логарифмических кривых этих прозрачных тел, градулюциками которых они являются.[111]

ГЛАВА V

О том, что все только что установленное может быть применено к телам, называемым непрозрачными

Быть может, не бесполезно будет теперь добавить, что все только что изложенное равным образом относится как к прозрачным телам, так и к тем, которые обычно называют *непро-*

зрачными. Можно полагать, что все эти тела отличаются друг от друга лишь в количественном отношении и что по сути все они должны быть прозрачными. Мы проверили это опытом; все тела, которые мы считали наиболее непрозрачными, заметно пропускали свет, как только их толщина доводилась до весьма малой величины. Логарифмическая кривая (необходимо, чтобы она приближалась очень быстро к своей оси и чтобы ее подкасательная была очень мала) должна, стало быть, представлять ослабления света в этих телах. Однако поскольку эта кривая линия, непрерывно приближаясь к своей оси, никогда с нею не встречается и поскольку члены геометрической прогрессии бесконечно уменьшаются, не обращаясь в нуль, ясно, что свет, который уменьшается, следуя той же прогрессии, также должен бесконечно уменьшаться, никогда не исчезая полностью.

Таким образом, непрозрачные тела непрозрачны не потому, что они полностью преграждают путь свету, а потому, что, как мы уже говорили, они заставляют его претерпевать ослабление слишком сильное, чтобы он мог затем оказывать заметное впечатление на наши глаза. Для того чтобы тела начинали становиться непрозрачными, необходимо, разумеется, чтобы ослабление доходило до совершенно одинаковой степени для всех тел, откуда следует, что толщины, при которых тела становятся непрозрачными, пропорциональны удельным прозрачностям тел или подкасательным их логарифмических кривых. Стало быть, если воздух прозрачнее воды, примерно, в 4600 раз, или подкасательная его логарифмической кривой в 4600 раз более подкасательной логарифмической кривой воды, как мы это полагали, то для того, чтобы сделать обе эти среды одинаково непрозрачными, первой надлежит придать толщину в 4600 раз большую, чем второй, то есть взять воздух в толще в 4600 раз большей, чем толща воды.

ГЛАВА VI

В то время как мы вынуждены учитывать при прохождении света через прозрачное тело в перпендикулярном направлении те изменения, которые он претерпевает от двух поверхностей, можно совершенно пренебречь влиянием вторичных отражений, третичных и т. д.

Мы не упускаем из рассмотрения то ослабление, которое претерпевает свет, проходящий через прозрачное тело, при встрече с двумя его поверхностями; положим, что оно уже было учтено, что никогда не приводит к каким-либо трудностям, если свет падает на обе поверхности под средними углами падения; часть света, которая будет отражена, равно как и та, которая будет погашена, будут весьма значительны. При перпендикулярном падении на вещества, из которых изготовлены наши обычные стекла, эти потери составляют, как было показано, примерно одну десятую часть; иными словами, они уменьшают свет в отношении 10 к 9. Таким образом, надлежит прежде всего откидывать одну десятую часть всего света, если только не начинать с разыскания других причин ослабления света с тем, чтобы откинуть затем одну десятую часть конечного результата. Если прочие причины ослабления доводят силу света, например, до трех четвертей ее первоначального значения, то надлежит уменьшить эти три четверти в отношении 10 к 9; это будет в точности то же самое, что взять $\frac{3}{4}$ от $\frac{9}{10}$. Порядок, в котором перемножаются эти отношения, не имеет никакого значения, как мы уже имели случай заметить. Поэтому тот и другой способ дают нам здесь для окончательной силы света одну и ту же величину $\frac{27}{40}$.

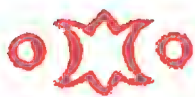
Однако помимо того первого действия, которое производят две поверхности прозрачного тела, действия, которое надлежит принимать в соображение, дабы не впасть в весьма ощутительные ошибки, те же поверхности производят другие действия, которыми можно всегда пренебрегать вследствие крайней их

малости. Предположим, что мы рассматриваем предмет, удаленный в направлении, перпендикулярном к граням AB и DC куска хрусталя AC (фиг. 30).[112] Тогда свет, проходя через прозрачное тело, будет падать на последнюю грань DC изнутри и претерпит отражение, которое, возвращая вспять одну 28-ю или одну 30-ю часть лучей, приведет их к внутренней стороне первой поверхности AB, где они претерпят отражение, подобное первоначальному. Новая часть лучей возобновит свой путь по направлению к глазу и, воссоединясь с основным светом, создаст изображение предмета. Но это еще не все: в этот второй раз через последнюю поверхность DC пройдет и выйдет наружу из прозрачного тела снова только часть лучей, как и в первый раз. Остальная часть возвратится обратно и, отразившись частично от поверхности AB, направится к глазу; и это повторится бесчисленное число раз. Таким образом, говоря геометрически, получается следующее: когда мы полагаем предмет видимым простым образом, получая от него лишь одно из его изображений, мы получаем в действительности бесконечное их число. Они накладываются одно на другое, и первое из изображений усиливается повторными чертами следующих, которые могли бы, однако, и не совпадать в точности с первичным изображением и искажать его или делать смутным, будь у них достаточно силы.

Если бы мы захотели оценить сумму всех этих светов — второго, третьего, четвертого и т. д., — то достаточно было бы найти соотношение между одним из них и последующим и заметить, что они следуют в своем уменьшении членам геометрической прогрессии. Свет, отраженный внутрь куска хрусталя заднею поверхностью CD, составляет лишь одну 28-ю или одну 30-ю часть света, получаемого этой поверхностью, и этот свет, отсылаемый к глазу переднею поверхностью AB, делается еще в 30 раз более слабым, иначе говоря, сводится к одной 900-й части. Сверх того, он уменьшается еще в четыре раза. Если мы предположим, что одно прохождение света через кусок стекла уменьшает, вследствие недостатка прозрач-

ности, его силу наполовину, то свет, возвращаясь к глазу, составляет, подходя к задней поверхности CD, лишь одну 3600-ю часть того, чем он был, когда он подходил к этой поверхности в первый раз; таково же соотношение между всеми остальными членами. Таким образом, обозначая через 3600 первоначальный или основной свет, мы получим для второго 1, для третьего $\frac{1}{3600}$ и так далее. Или же, если представить себе эту геометрическую прогрессию продолженною до бесконечности и разыскать ее полную сумму, то окажется, что она составляет лишь $3601\frac{1}{3544}$, что достаточно мало отличается от величины 3600, выражающей силу одного первого света, чтобы стоило принимать во внимание эту небольшую прибавку.[113]

Мы могли бы, входя в подробнейшие детали и оценивая все с полнейшею строгостью, разыскать другие последовательности членов или малых светов, которые, образуя другие геометрические прогрессии, могут способствовать усилению видимости предмета. Однако их суммы еще меньше тех, которые только что были исследованы нами; и при всей их сложности они не приведут в рассматриваемой связи ни к чему существенному. Как мы убедились, этого нельзя сказать о первичных действиях, оказываемых обеими поверхностями, которые, напротив, всегда уменьшают основной свет, и которыми, мы повторяем, отнюдь не следует пренебрегать.



РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

СПОСОБ ВЫЧИСЛЕНИЯ СИЛ СВЕТОВ, ПРОХОДЯЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ ТОЛЩИ ПРОЗРАЧНЫХ ТЕЛ, КОГДА ЛУЧИ ВПОЛНЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫ

Мы начнем с того, что выразим, дабы не упустить этого в дальнейшем, первой ординатой *QB* на фиг. 30 не то количество света, которому предстоит войти в прозрачное тело *ABCD*, а то же самое количество, претерпевшее уменьшение на одну десятую часть или на сумму трех различных ослаблений, которые причиняются последовательными встречами с двумя поверхностями *AB* и *CD*. Если при этом условии ординаты логарифмической кривой или количества света *QB*, *RF*, *SH*, *TL*, и т. д. составляют геометрическую прогрессию, то толщины *BF*, *FH*, *HL* будут равны между собою, и если искать логарифмы всех этих ординат или количеств света, то известно, что разности этих логарифмов будут также все равны между собою, ибо логарифмы образуют арифметическую прогрессию, когда сами величины составляют геометрическую прогрессию. Однако, поскольку разности логарифмов равны между собою, подобно тому, как и толщины *BF*, *FH*, *HL*, и т. д., то очевидно, что каждая разность логарифмов находится в таком же отношении к каждой малой толщине, как и все другие разности логарифмов к любой другой малой толщине. Столь же очевидно, что если сравнивать несколько разностей с равным числом малых толщин, то соотношение всегда будет одним и тем же.

Таким образом, если мы возьмем разность логарифмов двух ординат, весьма удаленных друг от друга, например RF и XP, то эта разность будет находиться в том же самом отношении к толщине FP, заключенной между этими двумя ординатами, ибо разность логарифма RF и логарифма XP будет состоять из разностей логарифмов всех ординат, заключенных между RF и XP, и полная разность будет содержать в точности такое же число малых разностей, что и число малых толщин FH, HL, и т. д., содержащихся в полной толщине FP. Мы можем, стало быть, принять в качестве принципа, что *когда свет проходит через различные толщи одного и того же тела, то отношение разности логарифмов двух ординат или количеств света QB и RF к толще BF, заключенной между ними, всегда таково же, как и отношение между разностью логарифмов двух любых других ординат или количеств света и соответствующею толщиною.*[114]

Дабы сделать эту истину более ощутимою, мы обращаем внимание читателя на связь, существующую между логарифмическою кривою и таблицею логарифмов, изобретенною бароном Непером. Семизначные числа этой таблицы, взятые вместе с характеристикою, означают не что иное, как размеры некоторой логарифмической кривой, подкасательная которой равна 4342945 частям.[115] Натуральные числа выражают длину ординат, в то время как логарифмы отмечают длину различных частей оси, начиная с некоторой точки. Тем самым разности логарифмов отмечают разности отрезков оси или расстояния между двумя ординатами. Именно поэтому, когда мы берем ряд чисел в геометрической прогрессии, их логарифмы оказываются в арифметической прогрессии; или, что сводится к тому же, разности логарифмов оказываются в точности равными.

Отсюда следует, что таблица логарифмов может выражать градацию света в среде, обладающей некоторою прозрачностью. Числа, носящие название натуральных, будучи взяты в обратном порядке (ибо свет всегда уменьшается), окажутся самыми

ступенями света, и разности логарифмов будут выражать различные толщи среды или различные части оси логарифмической кривой, заключенные между ординатами. Однако та же таблица может служить равным образом и для всех иных прозрачных тел, поскольку все логарифмические кривые отличаются от той кривой, по которой, как можно полагать, составлена таблица, лишь тем, что одинаковые ординаты расположены на большем или меньшем расстоянии друг от друга, причем эти расстояния всегда пропорциональны. Установив эти истины, мы займемся рассмотрением нижеследующих задач.

ПЕРВАЯ ЗАДАЧА

Найдя с помощью способов, изложенных в первой книге, часть света, проходящую сквозь данную толщу тела, обладающего повсюду одинаковою прозрачностью, определить часть света, проходящего сквозь все другие толщи того же тела

Вопрос сводится к тому, чтобы отыскать все ординаты логарифмической кривой $QRVY$, например VN, XP и т. д. (фиг. 30), когда две из них, например QB и RF, уже известны; первая выражает количество света, подходящего к телу, а вторая означает количество, беспрепятственно проходящее толщу BF или AE. Всякий раз, когда толщины BN, BP и т. д. представляют собою целые кратные толщины BF, возможно определить соответствующие ординаты VN, XP и т. д., продолжая геометрическую прогрессию, согласно которой уменьшается свет, или пользуясь отношением между двумя ординатами QB и RF. Если, например, известно, что свет уменьшается на две седьмых или, иначе говоря, сила его сводится к пяти седьмым при прохождении его сквозь кусок самого обычного оконного стекла, то достаточно положить ординаты QB и RF равными, соответственно, единице и пяти седьмым, и разыскать

остальные члены геометрической прогрессии: $1, \frac{5}{7}, \frac{25}{49}, \frac{125}{343}, \frac{625}{2401}, \frac{3125}{16\,807}, \frac{15\,625}{117\,649}, \frac{78\,125}{823\,543}, \frac{390\,625}{5\,764\,801}$ и т. д.,[116] чтобы получить длины всех ординат *SH*, *TL*, *VN* и т. д. или количества света, проходящего сквозь различные толщины *BH*, *BL*, *BN* и т. д. Девятый член $\frac{390\,625}{5\,764\,801}$ будет выражать, например, девятую ординату *YC* или силу, которую все еще имеет свет, прошедший восемь кусков стекла; отсюда видно, что свет будет иметь в этом случае примерно одну пятнадцатую часть своей первоначальной силы.

Этот способ может быть сделан более простым и общим, если принять во внимание одно весьма замечательное свойство геометрической прогрессии. Нетрудно показать, что квадрат первого члена относится к квадрату второго, как первый член к третьему; что куб или третья степень перього члена относится к третьей степени второго, как первый член к четвертому, и так далее. Таким образом, вообще некоторая степень первого члена всегда относится к той же степени второго, как первый член относится к другому члену, удаленному на такое число интервалов, какова степень первого и второго. Стало быть, если мы обозначим буквою *a* количество света, например *QB*, подходящего к среде *ABCD*, буквою *b* известное количество света *RF*, прошедшего известную толщу $BF = m$ и достигшего *EF* и, наконец, через *y* неизвестное количество *XP*, которое может проникнуть сквозь заданную толщу $BP = n$, то нам достаточно разделить толщу $BP = n$ на толщу $BF = m$, для того чтобы знать, сколько раз вторая содержится в первой или чтобы знать число $\frac{n}{m}$ промежутков между *QB*, то есть между первым членом прогрессии и ее последним членом *XP*, и мы сможем затем составить следующую пропорцию: первый член *QB*, возведенный в степень $\frac{n}{m}$, относится ко второму члену *RF*, возведенному в эту же степень, как первый член *QB* относится к последнему—*XP*. Выражаясь алгебраически, мы

получим

$$a^{\frac{n}{m}} : b^{\frac{n}{m}} :: a : y,$$

откуда

$$y = \frac{b^{\frac{n}{m}}}{a^{\frac{n}{m}-1}};$$

эта формула выражает значение y через известные величины.[117]

Однако поскольку часто бывает невозможно произвести извлечение корней, предписываемое этой формулой, то я полагаю, что на практике лучше обратиться к таблице логарифмов и воспользоваться принципом, который мы установили в начале этого раздела. Мы образуем, следовательно, такую пропорцию: *толщина BF относится к разности логарифмов ординат или количеств света QB и RF, как любая другая толщина BP относится к разности логарифмов ординат QB и XP; отнимая эту разность от логарифма QB, мы получим логарифм XP*. Таким образом, остается лишь найти в таблице число, которому соответствует этот логарифм, дабы получить количество света, проходящего заданную толщину *EP* или *AO* и беспрепятственно достигающего *OP*.

Попробуем, например, найти часть света, проходящего слой воздуха толщиною в 100 000 туаз, предполагая, что свет уменьшается в отношении 2500 к 1681 при прохождении 7469 туаз, как мы это заключили во втором разделе первой книги; возьмем разность логарифмов* чисел 2500 и 1681 или каких-либо других чисел, находящихся в том же отношении, и составим пропорцию: 7469 туаз относится к 1723723, то есть к разности логарифмов 2500 и 1681 или логарифму $\frac{2500}{1681}$, как 100 000 туаз к 23078364, то есть к разности логарифмов сил света в начале и в конце пути в 100 000 туаз или логарифму отноше-

* Мы всегда будем пользоваться логарифмами, имеющими лишь семь знаков после характеристики.

ния, в котором уменьшается свет. Этот логарифм соответствует, примерно, 203 или $\frac{203}{1}$, и мы видим, что уменьшение происходит в отношении 203 к 1 или что свет становится в 203 раза слабее, проходя слой воздуха толщиной в 100 000 туаз.

В качестве второго примера мы возьмем кусок обычного стекла, которым мы пользовались в наших первых опытах, и будем искать ослабление, которое претерпевает свет, проходя сквозь 74 подобных куска, наложенных друг на друга. Поскольку 16 кусков этого стекла ослабляют свет в 247 раз или уменьшают его в отношении 247 к 1, мы можем составить пропорцию: 16 относится к 2.3926969, то есть к разности логарифмов 247 и 1 или логарифму отношения $\frac{247}{1}$, как 74 к 11.0662232, то есть к разности логарифмов сил света при его входе и выходе или логарифму отношения, в котором свет ослабляется, проходя сквозь 74 куска стекла. Таким образом, можно найти, что свет уменьшается примерно в 116 472 400 000 раз; уменьшение непомерное, однако все еще недостаточное для того, чтобы помешать воздействию солнечного света на наши глаза.[118]

ВТОРАЯ ЗАДАЧА

Зная уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении известной толщи прозрачного тела, найти толщину, на которую свет должен проникнуть в это же тело, дабы претерпеть любое желаемое уменьшение

Эта задача обратна предыдущей и мы ее также сможем решить с помощью установленного нами общего принципа, согласно которому при прохождении света сквозь прозрачное тело отношение между разностью логарифмов различных сил света и толщинами, которые он проходит, всегда

постоянно. Предположим, следовательно, что ордината QB выражает количество света, подходящего к прозрачному телу $ABCD$; ордината RF выражает ту часть этого света, которая достигает EF после прохождения известной толщи BF или AE, и пусть требуется найти толщину BP, которую свет должен пройти, дабы сила его стала равной XP (фиг. 30). Тогда нам достаточно составить следующую пропорцию: *разность логарифмов ординат или количеств света QB и RF относится к толщине BF, как разность логарифмов ординат QB и XP к искомой толщине BP.*

Если угодно знать, например, сколько кусков стекла надо взять, дабы ослабить свет в 61 009 раз, считая, что речь идет о стекле, которым мы уже пользовались во многих наших опытах, и считая, что 16 кусков ослабляют свет в 247 раз, то можно найти из только что указанной пропорции, что надобно взять 32 куска, ибо логарифм 247, равный 2.3926969, относится к 16, как логарифм 61 009, равный 4.7853939, к 32.

Подобным же образом, если угодно знать, какой путь должен пройти свет в морской воде, дабы стать в 300 000 раз более слабым, или для того, чтобы солнечный свет имел на дне моря ту же интенсивность, что и свет полной луны, то следует воспользоваться отношением 3 к 2, которому, как можно полагать, следует свет в своем ослаблении при прохождении толщи морской воды в 10 футов.* Мы образуем затем следующую пропорцию: 1760912, то есть логарифм $\frac{3}{2}$ или избыток логарифма 3 над логарифмом 2, относится к 10 футам, как логарифм 300 000, или $\frac{300\,000}{1}$, равный 5.4771212, примерно к 311 футам. Таким образом, свет солнца на этой глубине будет иметь силу, равную лишь силе лунного света на земле.

---

* См. главу IV второго раздела первой книги или главу IV последнего раздела настоящей третьей книги.

ТРЕТЬЯ ЗАДАЧА

Зная с помощью способов, изложенных в первой книге, уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении некоторой толщи различных прозрачных тел, найти удельную прозрачность этих тел

Мы только что видели, что удельная прозрачность связана с большею или меньшею длиною пути, который свет должен пройти в различных средах, дабы претерпеть одинаковое уменьшение. Таким образом, нам не составит никакого труда разрешить эту задачу с помощью предыдущей. Нам остается лишь определить, какую толщину следует придать каждой среде, дабы уменьшить свет, безразлично насколько, лишь бы на одну и ту же величину; мы узнаем затем по найденным толщинам, насколько различные среды прозрачнее одна другой.

С помощью предыдущей задачи можно найти, например, что морская вода должна иметь толщину в $2\frac{974}{1000}$ дюйма или $\frac{2479}{10000}$ фута, дабы ослабить свет на одну сотую часть или в отношении 100 к 99; с другой стороны, плотный воздух у поверхности земли должен иметь толщину в 189 туаз, дабы произвести ту же степень ослабления. Следовательно, остается лишь подсчитать, насколько 189 туаз более $\frac{2479}{10000}$ фута, дабы заключить из этого, что воздух приблизительно в 4575 раз прозрачнее морской воды.[119] То же самое можно найти и разыскивая величины подкасательных логарифмических кривых, относящихся к различным средам. Это побуждает нас разыскивать эти подкасательные, которые к тому же позволят нам лучше знать логарифмические кривые, служащие градуюющиками всех тел.

ЧЕТВЕРТАЯ ЗАДАЧА

Найти подкасательную логарифмической кривой, свойственной прозрачному телу

Для этого нам достаточно обратить внимание на обстоятельство, установленное в конце предыдущего раздела, а именно на то, что если взять на двух различных логарифмических кривых несколько ординат одинаковой длины, например на логарифмической кривой $QRVY$, являющейся градулюцикою прозрачного тела $ABCD$ и на логарифмической кривой, исходя из которой, как можно уразуметь, построена таблица логарифмов, то части оси, заключенные между этими ординатами, будут находиться в том же отношении, что и подкасательные этих двух кривых (фиг. 30). Другими словами, части оси логарифмической кривой таблиц, или, что то же, разность логарифмов ее ординат, относится к частям оси другой логарифмической кривой, как подкасательная первой кривой к подкасательной второй кривой. Таким образом, если нам известны две ординаты, например QB и RF, или количество света, которому предстоит войти в прозрачное тело AB, и количество, которое достигает EF после прохождения толщи BF или AE, то нам достаточно в таблице логарифмов найти логарифмы этих двух количеств света QB и RF, дабы иметь возможность составить затем следующую пропорцию: *разность этих двух логарифмов относится к толщине BF, как подкасательная 4342948 логарифмической кривой таблиц*[120] *к подкасательной нашей логарифмической кривой $QRVY$.*[121]

Легко видеть, что подкасательная логарифмической кривой таблиц составляет 4342948 частей, ибо если взять две ординаты — одну в 10 000, а другую в 10 001, — логарифмы которых равны 4.0000000 и $4.0000434\,\frac{2728}{10000}$, и вычесть эти логарифмы один из другого, то мы получим для маленькой части оси, заключенной между этими двумя ординатами, значение $434\,\frac{2728}{10000}$. Если далее обратить внимание на то, что маленький треуголь-

ник, образованный разностью первой и второй ординат, составляющею 1, расстоянием $434\frac{2728}{10000}$ между первой и второй ординатами и малою частью кривой, является прямоугольным и приблизительно подобным большому прямоугольному треугольнику, образованному среднею ординатою $10\,000\frac{1}{2}$, лежащею между двумя другими ординатами 10 000 и 10 001, подкасательною и касательною, то нетрудно видеть, что можно составить следующую пропорцию: разность 1 двух ординат относится к расстоянию между ними $434\frac{2728}{10000}$, как средняя ордината $10\,000\frac{1}{2}$ к подкасательной 4342948.

Таким образом, мы знаем третий член всех тройных правил, которыми нам придется пользоваться для отыскания подкасательной логарифмических кривых, как например QVY, ординаты которых выражают различные ступени света. При этом подверженными изменению окажутся лишь первый и второй члены, зависящие от различной прозрачности тел.

Если мы хотим получить, например, подкасательную логарифмической кривой, отвечающей морской воде, то мы примем, как и ранее, что толща в 10 футов уменьшает свет в отношении 3 к 2, и возьмем разность логарифмов этих двух чисел. Поскольку она равна 1760912, мы можем составить следующую пропорцию: 1760912 относится к толщине в 10 футов, как подкасательная 4342948 таблицы логарифмов к $24\frac{2}{3}$ футам. Отсюда следует, что логарифмическая кривая, служащая градулюцикою морской воды и ординаты которой выражают количества проникающего света, имеет подкасательную в $24\frac{2}{3}$ фута.

Если угодно проделать тот же расчет для воздуха, задерживающего приблизительно третью часть света или уменьшающего число лучей света с 2500 до 1681 при толщине в 7469 туаз, то достаточно составить следующую пропорцию: разность 1723723 логарифмов 2500 и 1681 отно-

сится к 7469 туаз, как подкасательная таблица логарифмов 4342948 относится к равной приблизительно 18818 туазам покасательной логарифмической кривой, ординаты которой представляют силы света в воздухе. То же самое будет справедливо и для всех других сред; найденные подкасательные будут всегда показателями их удельных прозрачностей, равно как и различных толщин, кои должен пройти свет, дабы ослабиться на равную величину. Поэтому мы видим, что подкасательная воздуха, равная 18818 туазам, приблизительно в 4580 раз больше подкасательной морской воды, что означает, что первая из этих сред, как мы уже имели случай убедиться, соответственно прозрачнее второй.

ПЯТАЯ ЗАДАЧА

Зная из опыта уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении известной толщи прозрачного тела, определить толщину, которую необходимо придать телу, чтобы сделать его непрозрачным

Непрозрачность тел заключается, как мы видели выше, в том, что свет, проходящий через них, претерпевает весьма значительные уменьшения. Ясно, что это уменьшение должно быть доведено до одной и той же ступени во всех телах, которые становятся непрозрачными. Исходя из этого, достаточно знать эту ступень или степень ослабления, дабы найти с помощью второй задачи толщину, вызывающую это ослабление, или толщину, при которой тела теряют свою прозрачность. Однако на первый взгляд представляется достаточно трудным определить, какова точная степень этого значительного уменьшения.

Мы нашли, однако, чрезвычайно простой способ достигнуть указанной цели, сделав попросту несколько наблюдений с одним единственным прозрачным телом. Он заключается в том, чтобы определить с помощью методов, изложенных

в первом разделе, насколько это тело ослабляет свет, когда толщина его лишь незначительна; эту толщину увеличивают затем до тех пор, пока тело не станет непрозрачным. Уменьшение, причиняемое им в последнем случае, может быть определено, коль скоро известно уменьшение, причиняемое им в первом случае.

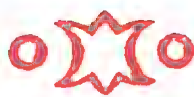
Дабы осуществить сказанное наиболее удобным образом, я воспользовался несколькими кусками обычного оконного стекла, того самого, которое ослабляет свет в 247 раз, когда последний проходит через 16 его кусков. Я расположил 74 куска этого стекла в трубке на некотором расстоянии друг от друга, и, направив свой взор к солнцу, которое имело возвышение приблизительно в 50°, я мог еще видеть некоторое подобие этого светила, хотя свет его был ослаблен приблизительно в 116 472 400 000 раз, как мы уже знаем из первой задачи. Многие лица, совместно с которыми я производил этот опыт, также видели слабое свечение, различая его лишь с трудом; оно тотчас же пропадало, если глаза их не находились в совершенной темноте. Когда же я, наконец, прибавил к 74 кускам еще 2 или 3 куска, мы не увидели более никакого света.

Однако я полагаю, что надлежит взять 80 кусков, дабы образовать толщу, которая совершенно не обладала бы прозрачностью и была бы непрозрачной даже для самого острого зрения. 80 кусков должны уменьшать свет в 919 358 226 007 раз; эта величина может быть найдена из пропорции: 16 кусков относятся к логарифму $\frac{247}{1}$ или 247, равному 2.3926969, как 80 к 11.9634848, то есть к логарифму 919 358 226 007. Таким образом, 80 кусков стекла, которые, казалось бы, полностью преграждают путь лучам, на самом деле не преграждают его вполне; они делают его приблизительно в девятьсот миллиардов раз более слабым.

Приняв во внимание эти наблюдения со стеклами, нетрудно найти толщину, которую должны иметь все другие прозрачные

тела, для того чтобы утратить свою прозрачность. Для этого достаточно найти с помощью второй задачи толщину, при которой свет уменьшается в девятьсот миллиардов раз, ибо как только они будут ослаблять свет в это большое число раз, их непрозрачность будет такой же, как и у наших 80 кусков стекла, и они должны стать непрозрачными не только по отношению к свету солнца, но также и по отношению к свету всех других предметов, коль скоро мы не знаем никакого другого предмета, который был бы столь же ярким, как и это светило. Найдя в нескольких опытах уменьшение, вызываемое небольшою толщею прозрачного тела, мы сейчас же можем составить, сообразно второй задаче, следующую пропорцию: *логарифм отношения, в котором уменьшается свет, так относится к толщине, на которой происходит это уменьшение, как логарифм, равный 11.9634848, относится к толщине, при которой данное тело становится непрозрачным.* В этой пропорции могут изменяться лишь первый и второй члены; что касается третьего, то он будет всегда постоянным.

Если попытаться установить с помощью этой пропорции, какова должна быть толща морской воды, при которой последняя потеряет всякую прозрачность, то получится 679 футов. Тот же способ, будучи приложен к приземному воздуху, дает 518 385 туаз или, приблизительно, 227 льё; это показывает нам, что если бы атмосфера простиралась на подобное расстояние от земли, сохраняя повсюду ту же плотность, что и у поверхности земли, то до нас не доходил бы свет ни одного из небесных светил и мы были бы навсегда погружены во мрак самой темной ночи.



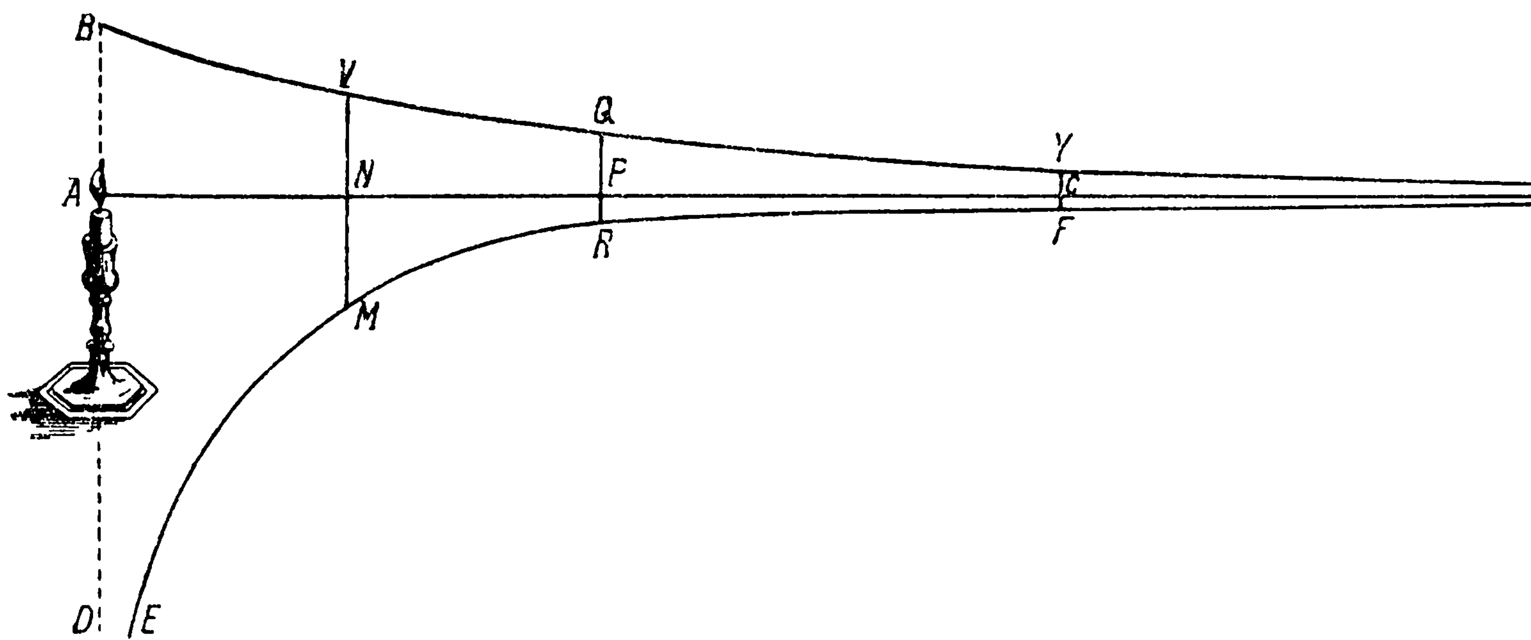
РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

СПОСОБ ВЫЧИСЛЯТЬ СИЛЫ СВЕТА В ТОМ СЛУЧАЕ, КОГДА СВЕТЯЩЕЕ ТЕЛО НЕ УДАЛЕНО НА БЕСКОНЕЧНОЕ РАССТОЯНИЕ

Мы предполагали, что светящее тело находится как бы на бесконечном расстоянии и что его лучи вполне параллельны. Мы не будем полагать его впредь находящимся на столь большом отдалении и будем принимать во внимание действие, вызываемое расхождением лучей.

В этом последнем случае свет претерпевает два рода уменьшений: одно — вследствие недостаточной прозрачности среды, всегда задерживающей некоторую часть лучей, и другое — вследствие того, что лучи, беспрепятственно следующие по своему пути, все время удаляются друг от друга и заполняют все большее пространство, что приводит к тому, что число лучей, падающих на данное место, оказывается меньшим. Если сопоставить это последнее уменьшение, следующее закону обратных квадратов расстояний, с первым уменьшением, возникающим вследствие недостатка прозрачности, то можно видеть, что различные силы света должны следовать закону, объединяющему закон пропорциональности ординатам логарифмической кривой и закон обратной пропорциональности квадратам расстояний; или, что сводится к тому же, силы света должны быть пропорциональны ординатам логарифмической кривой, деленным на квадраты расстояний до светящего тела.

Нетрудно видеть, что недостаточная прозрачность среды должна уменьшать свет в точности так, как это было указано выше, и заставлять его следовать отношению ординат той же самой логарифмической кривой, так как если лучи, выходящие из светильника, расходятся в виде конуса и идут, непрестанно удаляясь друг от друга, то это нимало не сказывается на возможности их задержания, ибо хотя пространства, по которым эти лучи распространяются, и содержат все большее число непрозрачных частиц или вообще каких-либо задерживающих свет частиц число пор, пропускающих лучи, также увеличивается. Все мыслимые гипотезы о пропускании света



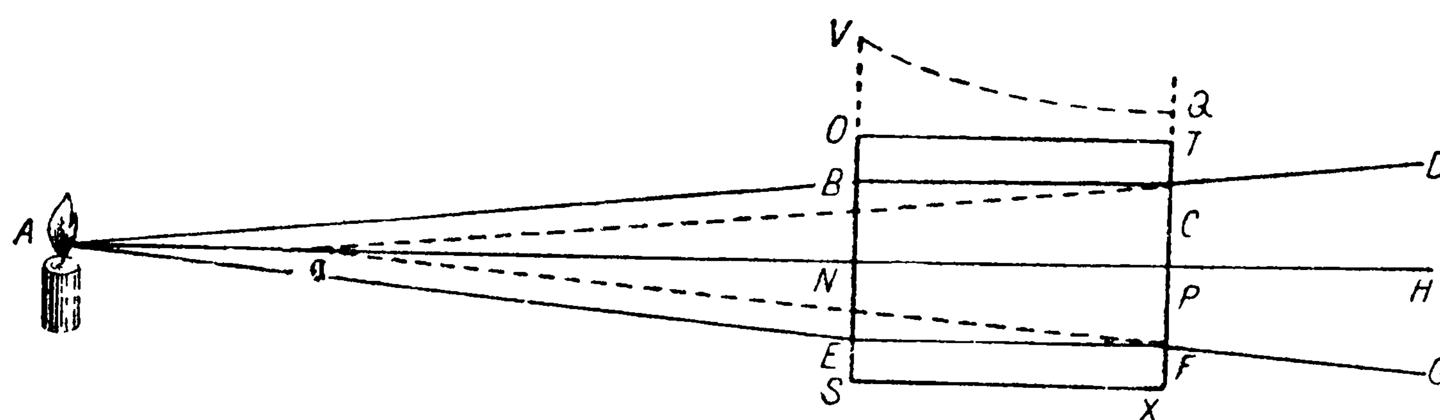
Фиг. 34.

допускают подобное объяснение. Предположим теперь, что световой конус разделен на бесконечное число слоев, параллельных друг другу и перпендикулярных оси, и что один из этих слоев задерживает, например, одну десятую часть лучей; все другие слои, имеющие ту же толщину, будут задерживать, несмотря на свою непрерывно возрастающую протяженность, также лишь одну десятую часть лучей, и общее количество света будет все время уменьшаться, следуя геометрической прогрессии, и будет попрежнему выражаться ординатами нашей логарифмической кривой.

Однако в то время как в случае бесконечной удаленности светящего тела этот свет занимает пространство одинаковой величины и лучи идут параллельно, здесь свет занимает все

большие пространства, возрастающие как квадраты расстояний. Именно вследствие этого свет, воспринимаемый на различных расстояниях, должен следовать уже не отношению ординат логарифмической кривой, а отношению этих ординат, деленных на квадраты расстояний, ибо свет не может распространяться во все возрастающем пространстве, не уменьшаясь при этом в пропорциональной мере.

Отсюда следует, что когда лучи не параллельны и расходимость их достаточно велика, то надлежит представлять светящее тело A (фиг. 34) совокупно с двумя различными кри-



Фиг. 35.

выми линиями, а именно логарифмическою кривою BQY, способ определения которой был нами показан, и другою кривою MRF, ординаты которой равны ординатам логарифмической кривой, деленным на квадраты абсцисс или квадраты расстояний до светящего тела. Эта вторая кривая будет градулюцикою.

То же самое будет иметь место в том случае, когда прозрачное тело не будет окружать со всех сторон светящее тело A (фиг. 35), а будет ограничено двумя параллельными плоскими поверхностями OS и TX, расположенными перпендикулярно направлению распространения света. Все такие лучи, как $ABCD$ и $AEFG$, за исключением единственного перпендикулярного луча AP, претерпевают преломление при встрече с двумя поверхностями OS и TX; однако они идут затем так, как если бы они исходили из мнимого фокуса a, и занимают в точности то же пространство, как если бы они действительно исходили из этой точки.

Таким образом, мы не встречаем здесь новых трудностей, и для того, чтобы сравнить силу света, входящего в точке N в прозрачное тело $OSTX$ с силою, которой он обладает, выходя из точки P, достаточно рассмотреть логарифмическую кривую VQ, ординаты которой выражают различные количества света, достигающего различных участков тела OX. Если мы разделим величину NV на величину занимаемого ею пространства или на квадрат расстояния AN до источника A, а величину PQ, достигающую точки P, на величину пространства, занимаемого ею в этом месте, или на квадрат расстояния aP до точки расхождения a, то частные $\frac{NV}{AN^2}$ и $\frac{PQ}{aP^2}$ будут означать различные степени силы света, входящего в прозрачное тело и выходящего из него.

Одним словом, общее правило нахождения различных степеней силы света заключается в том, чтобы разделять полное число лучей на площадь поверхности, занимаемой этими лучами. Однако вместо того, чтобы делить на саму площадь этих поверхностей, можно делить на какие-либо пропорциональные величины, как мы это здесь делали, деля на квадраты расстояний до светильника или до мнимого фокуса.

Кроме того, поскольку кривая MRF (фиг. 34) целиком зависит от логарифмической кривой BVQ, очевидно, что она должна также принадлежать к числу кривых, называемых механическими или трансцендентными. Таким образом, нельзя выразить в общем и конечном виде зависимость между ординатами и абсциссами: все, что возможно, это — воспользоваться рядом, который будет тем более точным, чем большее число членов его будет взято. Пусть h означает подкасательные логарифмической кривой BVQ, а x выражает отрезки оси этой кривой, или ее абсциссы, например AN или AP. Читатели, сведущие в геометрии, знают, что

$$1-\frac{x}{h}+\frac{x^2}{2h^2}-\frac{x^3}{6h^3}+\frac{x^4}{24h^4}-\dots$$

выражает величину соответствующих ординат, например NV или PQ.[122] Если же разделить эти значения ординат логарифмической кривой на квадраты x^2 абсцисс, то мы получим, в согласии с тем, что было уже установлено, бесконечный ряд

$$\frac{1}{x^2}-\frac{1}{hx}+\frac{1}{2h^2}-\frac{x}{6h^3}+\frac{x^2}{24h^4}-\frac{x^3}{120h^5}+\frac{x^4}{720h^6}-\ldots,$$

выражающий ординаты NM или PR иной кривой, а именно градулюцики, или, иначе говоря, выражающий силы света на всех возможных расстояниях x от светящего тела.

Мы могли бы, однако, вновь воспользоваться таблицей логарифмов, для того чтобы вычислить удобным образом различные степени света. Нужно лишь вспомнить то, что было уже повторено множество раз, а именно следующее: если найти в таблице логарифмов, изобретенной Непером, логарифмы ординат PQ, CY и т. д. логарифмической кривой BQY (фиг. 34), то разности всех этих логарифмов будут пропорциональны отрезкам NP, PC и т. д. оси AC. Они будут всегда находиться в том же отношении к этим отрезкам, в котором подкасательная логарифмической кривой, положенной в основу таблицы Непера, равная 4342948, находится к подкасательной логарифмической кривой BQY.

С помощью этого принципа мы вычислим, как и ранее, все ординаты этой логарифмической кривой BQY и, разделив их затем на квадраты их расстояний до светящего тела, мы получим различные степени силы света на различных расстояниях, другими словами — ординаты градулюцики EMF. Если мы знаем, напротив, некоторые ординаты этой второй кривой, то достаточно умножить их на квадраты расстояний до светящего тела или на квадраты расстояний до мнимого фокуса, если лучи претерпевают преломление, и произведения дадут нам соответствующие ординаты логарифмической кривой BQY. Таким образом, для того чтобы вывести ординаты градулюцики из ординат логарифмической кривой или, наоборот, получить вторые из первых, достаточно лишь умножать или делить

на квадраты расстояний до светящего тела. Об этом будет весьма важно вспомнить впоследствии.

Пусть, например, нам известны силы света NM и PR в точках N и P, и мы хотим узнать силу света CF в некоторой точке C; мы помножим известные силы NM и PR на квадраты расстояний AN и AP, дабы получить ординаты NV и PQ логарифмической кривой BVY. Зная эти две ординаты, мы найдем третью ординату CY из следующей пропорции: отрезок оси NP относится к разности логарифмов двух ординат NV и PQ, как отрезок NC к разности логарифмов NV и CY. Найдя эту разность, мы отнимаем ее от логарифма NV и получаем логарифм CY. Нам остается, наконец, разделить CY на квадрат расстояния AC, и мы получим искомую ординату CF, выражающую силу света в заданной точке C. Поступая таким образом и переходя от ординат одной из кривых к ординатам другой, можно решить все задачи, касающиеся силы света. Примеры этому можно найти в трех следующих предложениях, охватывающих, как мне кажется, важнейшие задачи, которые могут быть предложены по этому поводу, если не считать тех, кои относятся собственно к геометрии и для коих вопрос об измерении света является чисто случайным. Мы будем пользоваться, однако, алгебраическим исчислением, дабы сделать наши решения более общими и избежать излишней пространности рассуждений.

ПЕРВАЯ ЗАДАЧА

Сравнить в общем виде различные силы, которыми обладает свет на различных расстояниях от светящего тела, когда этот свет проходит сквозь тело, повсюду одинаково прозрачное

Я предполагаю, прежде всего, что прозрачное тело $OTXS$ (фиг. 35) заключено между двумя плоскими поверхностями OS, TX, перпендикулярными лучам AP, и что нам известно отношение синуса падения к синусу преломления для света,

входящего в тело под углом, и изменяющего свое направление. Я обозначаю это отношение синусов падения и преломления буквами e и f. Если обозначить через m и n расстояния AN и AP, то из сказанного в первой книге (глава IV первого раздела) ясно, что мнимый фокус a будет находиться с той же стороны, что и светящее тело A на расстоянии

$$Aa = \frac{e-f}{e}(n-m);$$

если отнять эту величину от $AP = n$, то можно найти, что $aP = \frac{(e-f)m+fn}{e}$.[123]

Я обозначаю, далее, через g подкасательную логарифмической кривой таблицы логарифмов и через h подкасательную логарифмической кривой VQ, отвечающей прозрачному телу OX и определяющей его прозрачность. Подкасательная g имеет 4342948 частей, а подкасательную h логарифмической кривой OX всегда легко найти. Я обозначаю, наконец, через p силу, коей обладает свет светильника A, когда он входит в прозрачное тело OX в точке N. Я обозначаю через p' эту же силу после того, как она уже уменьшилась на одну десятую вследствие трех изменений, претерпеваемых светом при последовательной встрече с двумя поверхностями OS и TX; q выражает силу, которую имеет свет по выходе из P.

Если мы теперь умножим p' на квадрат m^2 расстояния AN до светильника A, а q на квадрат $\frac{[(e-f)m+fn]^2}{e^2}$ расстояния aP до мнимого фокуса a, откуда лучи светильника представляются исходящими после того, как они прошли через прозрачное тело, то мы получим для величины двух ординат NV и PQ логарифмической кривой VQ значения $p'm^2$ и $q\frac{[(e-f)m+fn]^2}{e^2}$; пользуясь, далее, знаком Log для обозначения логарифмов чисел, мы можем написать следующую пропорцию: разность $\mathrm{Log}\, p'm^2 - \mathrm{Log}\, q\frac{[(e-f)m+fn]^2}{e^2}$ логарифмов двух ординат NV и PP относится к отрезку NP оси логарифмической кривой VQ

или к толщине $NP = n - m$ прозрачного тела OX, как подкасательная g логарифмической кривой таблиц к подкасательной h логарифмической кривой прозрачного тела.

Эта пропорция дает нам уравнение

$$h \operatorname{Log} p' m^2 - h \operatorname{Log} q \frac{[(e-f)m + fn]^2}{e^2} = gn - gm$$

или

$$\operatorname{Log} p' m^2 - \operatorname{Log} q \frac{[(e-f)m + fn]^2}{e^2} = \frac{g}{h}(n - m);$$

если мы обратим внимание на особое свойство логарифмов

$$\operatorname{Log} p' m^2 = \operatorname{Log} p' + \operatorname{Log} m^2 = \operatorname{Log} p' + 2 \operatorname{Log} m$$

и на то, что

$$\operatorname{Log} q \frac{[(e-f)m + fn]^2}{e^2} = \operatorname{Log} q + \operatorname{Log} \frac{[(e-f)m + fn]^2}{e^2} =$$

$$= \operatorname{Log} q + 2 \operatorname{Log} \frac{(e-f)m + fn}{e},$$

то мы сможем преобразовать уравнение

$$\operatorname{Log} p' m^2 - \operatorname{Log} q \frac{[(e-f)m + fn]^2}{e^2} = \frac{g}{h}(n - m)$$

в

$$\operatorname{Log} p' + 2 \operatorname{Log} m - \operatorname{Log} q - 2 \operatorname{Log} \frac{(e-f)m + fn}{e} = \frac{g}{h}(n - m),$$

что сводится к

$$\operatorname{Log} \frac{p'}{q} - 2 \operatorname{Log} \frac{(e-f)m + fn}{em} = \frac{g}{h}(n - m).$$

Так как это уравнение выражает общим образом соотношение, в котором находятся различные силы света p' и q и различные расстояния m и n, то нам остается лишь решить его, рассматривая последовательно различные буквы, входящие в него как неизвестные.[124] Подобным образом мы сможем решить все задачи, которые могут быть поставлены относи-

тельно силы света, получаемого на двух различных расстояниях от светящего тела.

РЕШЕНИЯ

I. Зная расстояния m и n до светящего тела, найти отношение $\frac{p}{q}$ сил света p и q.

Уравнение

$$\operatorname{Log}\frac{p'}{q} - 2\operatorname{Log}\frac{(e-f)m+fn}{em} = \frac{g}{h}(n-m)$$

дает нам другое уравнение

$$\operatorname{Log}\frac{p'}{q} = \frac{g}{h}(n-m) + 2\operatorname{Log}\frac{(e-f)m+fn}{em},$$

с помощью которого легко найти искомое отношение $\frac{p'}{q}$, если только мы располагаем, как всегда, таблицею логарифмов. Достаточно сложить удвоенный логарифм $\frac{(e-f)m+fn}{em}$ с $\frac{g}{h}(n-m)$, и мы получим логарифм $\frac{p'}{q}$; разыскивая в таблице этот логарифм, мы найдем против него величину $\frac{p'}{q}$. Если прозрачное тело состоит из хрусталя, то достаточно увеличить отношение $\frac{p'}{q}$ на одну десятую часть, чтобы узнать, во сколько раз свет, воспринимаемый в N, сильнее того, который может быть получен в P.

Если OX представляет собою, например, массу морской воды, то на место букв e и f можно поставить числа 4 и 3, ибо, когда свет входит в воду, синус угла падения относится к синусу угла преломления приблизительно как 4 к 3. Мы имеем, следовательно,

$$\operatorname{Log}\frac{p'}{q} = \frac{g}{h}(n-m) + 2\operatorname{Log}\frac{m+3n}{4m}$$

и если вместо g подставить 4342948, а вместо h подставить 25 футов, то получится

$$\operatorname{Log}\frac{p'}{q}=\frac{4342948}{25}(n-m)+2\operatorname{Log}\frac{m+3n}{4m},$$

и в это выражение остается лишь подставить значения расстояний AN и AP, выраженные в футах, дабы получить логарифм отношения $\frac{p'}{q}$, а затем и отношение $\frac{p}{q}$ сил света в N и P, то есть при входе в массу воды и по выходе из нее.

Если, с другой стороны, свет пронизывает прозрачное тело, не претерпевая преломления, что должно иметь место в том случае, когда прозрачное тело окружает источник света со всех сторон или когда оно само заключено между двумя сферическими поверхностями OS и TX, центром которых служит светящее тело, то можно полагать величины e и f равными друг другу; расстояние Aa будет при этом равно нулю, и вместо формулы

$$\operatorname{Log}\frac{p'}{q}=\frac{g}{h}(n-m)+2\operatorname{Log}\frac{(e-f)m+fn}{em}$$

мы получим иную, значительно более простую формулу

$$\operatorname{Log}\frac{p'}{q}=\frac{g}{h}(n-m)+2\operatorname{Log}\frac{n}{m},$$

которая, однако, оказывается пригодной в очень большом числе случаев. Достаточно, например, подставить вместо g и h 4342948 и 18818 туаз, чтобы определить по этой формуле отношение сил p и q, которыми обладает свет светильника, воспринимаемый на любых расстояниях m и n от светящего тела и проходящий лишь сквозь приземный воздух.

II. Определить, на каких расстояниях (m и n) от светящего тела надлежит расположиться, чтобы эти два расстояния находились в заданном отношении (b к c), а силы света также находились в заданном отношении (p к q).

Из уравнения

$$\mathrm{Log}\,\frac{p'}{q} - 2\,\mathrm{Log}\,\frac{(e-f)\,m + fn}{em} = \frac{g}{h}\,(n-m)$$

можно вывести другое уравнение

$$n - m = \frac{h}{g}\,\mathrm{Log}\,\frac{p'}{q} - \frac{2h}{g}\,\mathrm{Log}\,\frac{(e-f)\,m + fn}{em}$$

или

$$n - m = \frac{h}{g}\,\mathrm{Log}\,\frac{p'}{q} - \frac{2h}{g}\,\mathrm{Log}\left(\frac{e-f}{e} + \frac{fn}{me}\right),$$

выражающее через полностью известные величины разность $n - m$ двух расстояний до светящего тела.

Член $\frac{2h}{g}\,\mathrm{Log}\left(\frac{e-f}{e} + \frac{fn}{em}\right)$ предполагает известными не сами расстояния m и n, а лишь их отношение $\frac{m}{n}$, и если обозначить последнее через $\frac{c}{b}$, то получится

$$n - m = \frac{h}{g}\,\mathrm{Log}\,\frac{p'}{q} - \frac{2h}{g}\,\mathrm{Log}\left(\frac{e-f}{e} + \frac{fc}{eb}\right).$$

После того как разность $n - m$ будет найдена с помощью этой формулы, вопрос сведется к нахождению двух чисел, разность коих $n - m$ и отношение коих $\frac{c}{b}$ известны. Таким образом, нам остается лишь составить следующие пропорции: $c - b$ относится к $n - m$, как b к m или как c к n.

Приложим сказанное к светильнику, свет которого распространяется в приземном воздухе, и найдем, на каких расстояниях, одно из которых в два раза более другого, следует поместиться, дабы свет в первой точке был в десять раз сильнее, нежели во второй.

Общая формула

$$n - m = \frac{h}{g}\,\mathrm{Log}\,\frac{p'}{q} - \frac{2h}{g}\,\mathrm{Log}\left(\frac{e-f}{e} + \frac{fc}{eb}\right)$$

приобретет вид

$$n - m = \frac{18818}{4342948} \operatorname{Log} \frac{p'}{q} - \frac{37636}{4342948} \operatorname{Log} \frac{c}{b}.$$

ибо мы должны положить подкасательные g и h равными 4342948 и 18818, и считать величины e и f равными друг другу, поскольку лучи не претерпевают в рассматриваемом случае никакого преломления.[125] Если, далее, мы желаем, чтобы свет был в десять раз более слабым, несмотря на то, что мы помещаемся на расстоянии всего лишь в два раза более удаленном от светильника, то достаточно подставить числа 10 и 1 вместо букв p' и q, а числа 2 и 1 вместо c и b, и мы получим

$$n - m = \frac{18818}{4342948} \operatorname{Log} \frac{10}{1} - \frac{37636}{4342948} \operatorname{Log} \frac{2}{1} =$$

$$= \frac{18818}{4342948}\, 10000000 - \frac{37636}{4342948}\, 3010300;$$

отсюда мы видим, что разность $n - m$ двух расстояний n и m должна быть равна приблизительно 17 243 туаз.

Теперь остается лишь составить две следующие пропорции: $c - b = 1$ относится к $n - m = 17\,243$ туаз, как $b = 1$ относится к m и как $c = 2$ относится к n, откуда видно, что двумя расстояниями m и n, удовлетворяющими условию задачи, будут 17 243 и 34 486 туаз. Другими словами, необходимо удалиться от светильника на 17 243 туаз и на 34 486 туаз, дабы силы света находились в отношении 10 к 1, в то время как отношение расстояний составляет лишь 2 к 1.

III. Определить, на каких расстояниях m и n от светящего тела надобно расположиться, если угодно, чтобы, при известной разности этих расстояний $n - m$ или известной толщине прозрачного тела, силы света p и q находились в заданном отношении.

Возьмем формулу

$$\mathrm{Log}\,\frac{(e-f)m+fn}{em}=\frac{1}{2}\,\mathrm{Log}\,\frac{p'}{q}-\frac{g}{2h}(n-m),$$

второй член которой полностью известен, ибо мы знаем подкасательные g и h и отношение $\frac{p'}{q}$ сил света p' и q, равно как и разность $n-m$ двух расстояний n и m. Если теперь мы разыщем в таблице логарифмов, какому натуральному числу отвечает $\frac{1}{2}\,\mathrm{Log}\frac{p'}{q}-\frac{g}{2h}(n-m)$, то мы найдем значение $\frac{(e-f)\,m+fn}{em}$, поскольку логарифм этой величины, согласно нашей формуле, равен $\frac{1}{2}\,\mathrm{Log}\frac{p'}{q}-\frac{g}{2h}(n-m)$.[126]

Однако, зная величину $\frac{(e-f)m+fn}{em}$ вместе с заданною величиною $n-m$, очень легко найти расстояния n и m. Действительно, обозначив через k величину $\frac{(e-f)m+fn}{em}$, а через i величину $n-m$, мы получим два уравнения:

$$k=\frac{(e-f)m+fn}{em}$$

и

$$i=n-m,$$

которые дадут нам два различных выражения для n, а именно:

$$n=\frac{(ek-e+f)m}{f}$$

и

$$n=i+m;$$

сравнивая друг с другом эти выражения, мы получим

$$\frac{(ek-e+f)m}{f}=i+m,$$

откуда мы найдем, что

$$m = \frac{fi}{ek - e};$$

другое расстояние будет, соответственно, равно

$$n = \frac{fi}{ek - e} + i.$$

Таким образом, если мы знаем разность $n - m$ двух расстояний AN и AP или если мы знаем толщину NP прозрачного тела $OTXS$ и если мы желаем знать, на каком расстоянии от светящего тела надобно расположиться, дабы силы света, входящего в N и выходящего из P, находились в отношении $\frac{p}{q}$, то, согласно формуле, достаточно найти в таблице логарифмов число, логарифм которого равен $\frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{p'}{q} - \frac{g}{2h}(n - m)$ или равен $\frac{1}{2}\mathrm{Log}\, p' - \frac{1}{2}\mathrm{Log}\, q - \frac{g}{2h}(n - m)$; мы получим, таким образом, значение $\frac{(e - f)\,m + fn}{em}$ и, подставляя это значение вместо k, а толщину прозрачного тела $n - m$ вместо i и подставляя вместо e и f числа, выражающие отношение синуса падения к синусу преломления, мы получим из формулы

$$m = \frac{fi}{ek - e}$$

искомое расстояние AN, на которое прозрачное тело OX должно быть удалено от светильника A, дабы произвести желаемое действие.

IV. Зная силу света на некотором расстоянии от светящего тела, найти, на каком расстоянии следует расположиться, чтобы свет оказался сильнее или слабее в некотором, точно заданном, отношении.

Эта задача труднее предыдущих, ибо в то время, как те могли быть решены непосредственно с помощью таблицы

логарифмов, настоящая задача может быть решена этим способом лишь путем подбора или приближения. Это отличие проистекает из того, что в уравнение

$$\mathrm{Log}\frac{p'}{q} - 2\,\mathrm{Log}\frac{(e-f)\,m + fn}{em} = \frac{g}{h}(n-m)$$

входят не только сами расстояния m и n, но также и их логарифмы. Вследствие того, что соотношение, существующее между какой-либо величиной и ее логарифмом, вообще говоря, неизвестно, мы не можем найти с помощью правил алгебры расстояния m или n, полагаемые неизвестными.

Если, например, нам известна сила света p светильника A, воспринимаемого с расстояния $AN = m$, и мы желаем найти расстояние $AP = n$, на котором надлежит поместиться для того, чтобы сила света выражалась величиною q, то мы воспользуемся формулой

$$\frac{g}{h}n + 2\,\mathrm{Log}\frac{(e-f)\,m + fn}{em} = \frac{g}{h}m + \mathrm{Log}\frac{p'}{q},$$

перенося по одну сторону от знака равенства члены, содержащие букву n; если мы примем во внимание, что

$$2\,\mathrm{Log}\frac{(e-f)\,m + fn}{em} = 2\,\mathrm{Log}\frac{(e-f)\,m + fn}{e} - 2\,\mathrm{Log}\,m,$$

то мы получим,

$$\frac{g}{h}n + 2\,\mathrm{Log}\frac{(e-f)\,m + fn}{e} = \frac{g}{h}m + 2\,\mathrm{Log}\,m + \mathrm{Log}\frac{p'}{q}.$$

Ясно, однако, что мы не сможем продвинуться далее, по причинам, указанным выше, ибо для того чтобы определить расстояние, необходимо прибегнуть или к подбору или к каким-либо приближенным способам.

То же самое будет иметь место, если свет, проходя через прозрачное тело, не испытывает преломления, ибо мы получим формулу

$$\frac{g}{h}n + 2\,\mathrm{Log}\,n = \frac{g}{h}\,m + 2\,\mathrm{Log}\,m + \mathrm{Log}\,\frac{p'}{q},$$

которую мы опять не сможем разрешить относительно n. Таким образом, мы будем вынуждены приписывать букве n различные значения, пока $\frac{g}{h}n + 2\,\mathrm{Log}\,n$, или, вообще, $\frac{g}{h}n + 2\,\mathrm{Log}\,\frac{(e-f)m+fn}{e}$ не станет равным известной величине $\frac{g}{h}\,m + 2\,\mathrm{Log}\,m + \mathrm{Log}\,\frac{p'}{q}$.

Предположим, что свет светильника воспринимается на открытом воздухе с расстояния в 1000 туаз и что надобно знать, на каком ином расстоянии надлежит поместиться, дабы свет был в четыре раза слабее. Подставляя вместо g и h 4342948 и 18818 туаз, вместо m подставляя 1000 и вместо букв p и q, выражающих отношение сил света, подставляя 4 и 1, мы найдем сначала для величины $\frac{g}{h}\,m + 2\,\mathrm{Log}\,m + \mathrm{Log}\,\frac{p}{q}$ значение 66251386. Затем надлежит приписывать n различные значения, пока $\frac{g}{h}\,n + 2\,\mathrm{Log}\,n$ не станет равным 66251386.[127] Это искомое значение n оказывается равным 1950 туаз и, приблизительно, 1 футу; это и будет, таким образом, то расстояние, на котором надлежит поместиться, дабы свет светильника стал в четыре раза слабее, чем в том случае, когда его воспринимают с расстояния в 1000 туаз.

Решение задачи построением с помощью пересечения двух геометрических мест.

Хотя мы и не можем разрешить уравнение

$$\frac{g}{h}\,n + 2\mathrm{Log}\,\frac{(e-f)\,m+fn}{e} = \frac{g}{h}m + 2\,\mathrm{Log}\,m + \mathrm{Log}\frac{p'}{q}$$

в общем виде и путем прямого вычисления, мы всегда можем легко сделать это путем построения, взяв два подходящих геометрических места, одним из которых должна быть, есте-

ственно, логарифмическая кривая. Дабы упростить действия, я введу новую неизвестную s и предположу, что

$$\mathrm{Log}\frac{(e-f)m+fn}{e}=\mathrm{Log}\,s$$

или

$$\frac{(e-f)m+fn}{e}=s,$$

что дает

$$n=\frac{es+(f-e)m}{f};$$

вводя эту величину вместо n и величину $\mathrm{Log}\,s$ вместо $\mathrm{Log}\,\frac{(e-f)m+fn}{e}$ в наше уравнение

$$\frac{g}{h}n+2\mathrm{Log}\,\frac{(e-f)m+fn}{e}=\frac{g}{h}m+2\,\mathrm{Log}\,m+\mathrm{Log}\frac{p'}{q},$$

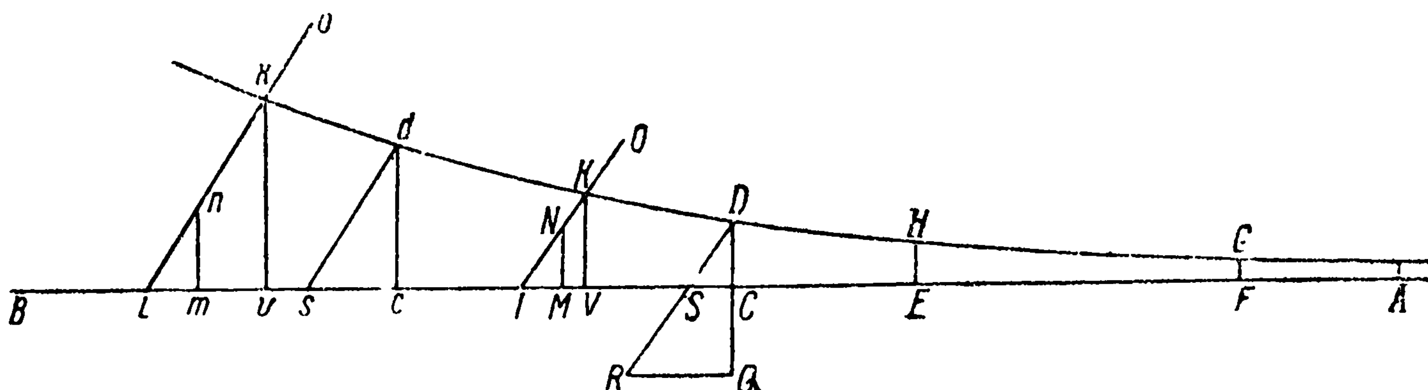
мы получим новое уравнение

$$\frac{ges+g(f-e)m}{hf}+2\mathrm{Log}\,s=\frac{g}{h}m+2\,\mathrm{Log}\,m+\mathrm{Log}\,\frac{p'}{c}$$

или

$$\frac{ges}{2hf}+\mathrm{Log}\,s=\frac{gem}{2hf}+\mathrm{Log}\,m+\frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{p'}{q},$$

построение которого гораздо легче осуществить.



Фиг. 36.

Начертим, прежде всего, на оси BA (фиг. 36) логарифмическую кривую KHG, дабы изобразить ту кривую, из кото-

рой выведена таблица логарифмов. Величина подкасательной g может быть какою угодно, поскольку все логарифмические кривые обладают одним и тем же свойством по отношению к логарифмам и можно всегда считать, что их подкасательная состоит из 4342948 частей. Если мы возьмем далее в качестве начала абсцисс точку A и сделаем расстояние AI равным полностью известному второму члену $\frac{gem}{2hf} + \operatorname{Log} m + \frac{1}{2}\operatorname{Log}\frac{p'}{q}$ нашего уравнения, то нам останется лишь провести из точки I прямую линию IO таким образом, чтобы IM находилось с перпендикуляром MN в отношении ge к $2hf$; ордината KV, проведенная из точки пересечения K этой прямой линии и логарифмической кривой перпендикулярно к оси AB, будет иметь величину s.

Действительно, поскольку KV имеет величину s, а AV величину $\operatorname{Log} s$, что следует из логарифмической кривой, и поскольку IV равно $\frac{ges}{2hf}$, в силу пропорции

$$2hf : ge :: MN : IM :: VK = s : IV = \frac{ge}{2hf}s,$$

мы получим, что $\frac{ge}{2hf}s + \operatorname{Log} s$ равно $AV + VI$ или AI, то есть величине, уже приравненной $\frac{gem}{2hf} + \operatorname{Log} m + \frac{1}{2}\operatorname{Log}\frac{p'}{q}$.[101] Мы осуществим, следовательно, полное построение нашего уравнения

$$\frac{ge}{2hf}s + \operatorname{Log} s = \frac{gem}{2hf} + \operatorname{Log} m + \frac{1}{2}\operatorname{Log}\frac{p'}{q}.$$

Поскольку значение VK величины s оказывается известным, остается лишь ввести его в уравнение

$$n = \frac{es + (f - e)m}{f}$$

и мы получим искомое расстояние n.

Небесполезно будет указать здесь, каким образом можно легко сделать расстояние IA равным

$$\frac{ge}{2hf}m + \mathrm{Log}\,m + \frac{1}{2}\,\mathrm{Log}\frac{p'}{q}\,.$$

Выберем, прежде всего, ординату DC равной m, то есть равной расстоянию до светящего тела, на котором последнее освещает с силою p'; продолжим, затем, ординату DC по направлению к Q таким образом, чтобы $DQ = 2hf$, а из точки Q проведем $QR = ge$ параллельно оси AB; тогда мы сможем провести прямую линию DR. Нетрудно видеть, что SA будет равно $\frac{ge}{2hf}m + \mathrm{Log}\,m$, ибо SC будет равно $\frac{ge}{2fh}m$ в силу пропорции

$$DQ = 2hf : QR = ge :: DC = m : SC,$$

а, с другой стороны, CA равно $\mathrm{Log}\,m$ в силу того, что кривая KHG является логарифмической кривой.[101]

Затем мы выберем две ординаты HE и GF равными величинам p' и q, выражающим соотношение, которое желают получить между силами света, воспринимаемого на двух расстояниях m и n; поскольку EA равно $\mathrm{Log}\,p'$ и FA равно $\mathrm{Log}\,q$, то очевидно, что часть EF оси, заключенная между двумя ординатами HE и GF, будет равна $\mathrm{Log}\,p' - \mathrm{Log}\,q = \mathrm{Log}\,\frac{p'}{q}$, и что, таким образом, половина EF будет равна $\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,\frac{p'}{q}$. Отсюда следует, что достаточно отложить эту половину EF от S до I, дабы IA или $AS + SI$ оказалось равным $\frac{ge}{2hf}m + \mathrm{Log}\,m + \frac{1}{2}\,\mathrm{Log}\frac{p'}{q}$ и дабы можно было определить точку I, из которой должна исходить линия IO. Можно заметить также, что достаточно провести эту линию IO параллельно RD, ибо DC относится к SC как $2hf$ к ge, а KV должно находиться с IV в том же самом отношении. Это показывает, что треугольники SDC и KIV подобны и что углы DSC и KIV равны.

Найти простым способом для частного случая, когда лучи не претерпевают преломления, бесконечное множество точек, в которых два света находятся в заданном отношении.[128] Если мы, наконец, предположим, что свет, проходя через прозрачное тело, не претерпевает преломления, подобно тому, как он не претерпевает его, проходя сквозь воздух, то величины e и f будут равными, а s, которое мы полагали равным $\frac{(e-f)m+fn}{e}$, окажется равным n. Отсюда следует, что, найдя ординату $KV=s$, мы получим в этом случае расстояние, на котором следует расположить светящее тело, дабы q выражало силу его света. Если мы к тому же будем считать логарифмическую кривую KHG принадлежащей прозрачному телу и определяющ й его прозрачность, то подкасательные g и h будут равными, а DQ, которое, вообще говоря, относится к QR, как $2hf$ к ge, будет в нашем случае равно удвоенной величине QR и, следовательно, DC будет также равно удвоенной величине SC, равно как и KV и IV.

Таким образом, чтобы найти в рассматриваемом случае бесконечное множество расстояний m и n, при которых силы света будут находиться в заданном отношении p' к q, или HE к GF, достаточно нанести в любом месте оси BA логарифмической кривой KHG половину от EF или от $\mathrm{Log}\frac{p'}{q}$.[126] Если при этом провести из точек I и S или i и s и т. д., удаленных одна от другой на половину EF, параллельные линии SD и IO или sd и io, так, чтобы перпендикуляр MN или mn был в два раза более IM или im, и опустить из точек D и K или d и k, в которых параллели SD и IO и т. д. пересекают логарифмическую кривую, ординаты DC и KV или dc и kv, то эти ординаты будут равны расстояниям m и n от светящего тела, на которых надлежит расположиться, дабы силы света находились в заданном отношении p' к q.[129] Мы видим также, что столь же просто найти то или другое из этих расстояний, коль скоро одно из них известно.

ВТОРАЯ ЗАДАЧА

Установить заданное отношение между светом, воспринимаемым непосредственно от светящего тела, и светом, воспринимаемым с того же расстояния после прохождения сквозь прозрачное тело

Примем, что мы недостаточно удалены от светящего тела, чтобы пренебрегать расходимостью лучей и пользоваться некоторыми частными случаями, уже рассмотренными в предыдущем разделе. Мы будем сравнивать оба света на открытом воздухе; при этом нет необходимости учитывать небольшой недостаток прозрачности этой среды ввиду нашей незначительной удаленности от светящего тела. Таким образом, прямой свет станет просто ослабляться обратно пропорционально квадрату расстояния; две его различные силы на двух различных расстояниях, равных AN и AP (фиг. 35), будут выражаться через $\frac{1}{AN^2}$ и $\frac{1}{AP^2}$. Лучи светящего тела проходят, вместе с тем, через прозрачное тело OX, и мы хотим иметь заданное отношение между этими двумя светами, прямым и прошедшим сквозь прозрачное тело, кои мы воспринимаем друг около друга.

Мы обозначим это отношение через p и q; обозначим в то же время через x расстояние AP до светящего тела, а через u толщину прозрачного тела, и воспользуемся также другими, введенными ранее, обозначениями, а именно: e и f — синусы, отношение которых постоянно при преломлении; это дает нам для Aa величину $\frac{e-f}{e}u$; g и h — подкасательные логарифмической кривой обычных таблиц и логарифмической кривой, относящейся к прозрачному телу. Сила прямого света, воспринимаемого на расстоянии x будет $\frac{1}{x^2}$; поскольку она должна превосходить силу света, выходящего из прозрачного тела, в отношении p к q, мы получим для

выражения этой последней или для последней ординаты градулюцики прозрачного тела величину $\frac{q}{px^2}$; если, в согласии с тем, что было установлено в начале этого раздела, мы помножим ее на квадрат расстояния $x+\frac{f-e}{e}u$ до мнимого фокуса a, то мы получим для ординаты PQ логарифмической кривой VQ выражение $\frac{q}{px^2}\left[\frac{ex+(f-e)u}{e}\right]^2$.

С другой стороны, сила прямого света на расстоянии $AN=x-u$ равна $\frac{1}{(x-u)^2}$, и это как раз та сила, которую имеет свет, проникая в прозрачное тело. Таким образом, $\frac{1}{(x-u)^2}$ выражает также первую ординату градулюцики этого тела; однако, обозначая через i известную нам дробь, выражающую отношение, в котором его две поверхности уменьшают свет, мы сведем $\frac{1}{(x-u)^2}$ к $\frac{i}{(x-u)^2}$; умножая эту последнюю величину на квадрат расстояния AN, мы получим величину i, выражающую первую ординату NV логарифмической кривой, предписывающей уменьшения, кои претерпевают свет, встречая на своем пути внутренние части прозрачного тела OX.

Предположим, наконец, что логарифмы ординат $NV=i$ и $PQ=\frac{q}{px^2}\left[\frac{ex+(f-e)u}{e}\right]^2$ отыскиваются в обычных таблицах логарифмов или по относящейся к ним логарифмической кривой;[130] обозначим их через $\mathrm{Log}\, i$ и $\mathrm{Log}\frac{q}{px^2}\left[\frac{ex+(f-e)u}{e}\right]^2$ и составим следующую пропорцию: подкасательная g этой первой логарифмической кривой относится к подкасательной h второй кривой, как избыток одного логарифма над другим, а именно $\mathrm{Log}\, i-\mathrm{Log}\frac{q}{px^2}\left[\frac{ex+(f-e)u}{e}\right]^2$ относится к $NP=u$, что является разностью тех же логарифмов, взятых по логарифмической кривой прозрачного тела. Таким образом, мы получим уравнение

$$\frac{gu}{h}=\mathrm{Log}\, i-\mathrm{Log}\frac{q}{px^2}\left[\frac{ex+(f-e)u}{e}\right]^2,$$

сводящееся к

$$\frac{g}{h}u = \text{Log}\, i + \text{Log}\, p - \text{Log}\, q - 2\,\text{Log}\,\frac{ex + (f-e)u}{ex},$$

в котором мы можем считать поочередно известными расстояние x до светящего тела и толщину u прозрачного тела и искать другую величину.[131] Этим путем мы достигнем решения двух достаточно любопытных задач, которые могут в некоторых случаях оказаться небесполезными.

РЕШЕНИЯ

I. При заданной толщине прозрачного тела u найти, на каком расстоянии x от светящего тела A (фиг. 35) следует расположиться, чтобы воспринимаемый прямой свет и свет, прошедший сквозь прозрачное тело, находились в отношении p к q.

Наше общее уравнение

$$\frac{g}{h}u = \text{Log}\, i + \text{Log}\, p - \text{Log}\, q - 2\,\text{Log}\,\frac{ex + (f-e)u}{ex}$$

переходит в уравнение

$$\text{Log}\,\frac{ex + (f-e)u}{ex} = \frac{1}{2}\,\text{Log}\, i + \frac{1}{2}\,\text{Log}\, p - \frac{1}{2}\,\text{Log}\, q - \frac{g}{2h}u,$$

второй член которого полностью известен. Стало быть, мы будем знать и первый член и, обращаясь к обычным таблицам логарифмов, найдем $\frac{ex + (f-e)u}{ex}$. Считая его величину, найденную в таблицах, равной k, и разрешая наше уравнение относительно x, мы получим

$$x = \frac{(e-f)u}{e - ek},$$

что выражает расстояние, на коем следует расположиться от светящего тела, дабы оба воспринимаемые друг подле друга света находились в отношении p к q.

II. При заданном от светящего тела расстоянии x или AP, на котором желают расположиться, найти толщину u или NP, которую должно иметь прозрачное тело, чтобы между прямым светом и светом, прошедшим сквозь прозрачное тело, было отношение p к q.[132]

Эта задача относится к тем, которые могут быть разрешены лишь подбором или с помощью рядов; мы найдем, однако, ее решение с помощью графической операции, подобной обычным геометрическим построениям. Преобразуем, прежде всего, наше общее уравнение в

$$\mathrm{Log}\left(\frac{ex+(f-e)u}{e}\right)+\frac{g}{2h}u=\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,p+\mathrm{Log}\,x+\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,i-\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,q$$

и, положив $\frac{ex+(f-e)u}{e}$ равной новой неизвестной s, получим выражение $u=\frac{ex-es}{e-f}$, которое мы введем в наше уравнение, получив, таким образом, уравнение

$$\mathrm{Log}\,s+\frac{gex+ges}{2eh-2fh}=\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,p+\mathrm{Log}\,x+\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,i-\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,q$$

или

$$\mathrm{Log}\,s+\frac{ges}{2eh-2fh}=\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,p+\mathrm{Log}\,x+\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,i-\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,q-$$
$$-\frac{gex}{2eh-2fh},$$

второй член которого полностью известен и которое легко доступно построению.

Проведем логарифмическую кривую KHG (фиг. 36), беря в качестве подкасательной g и полагая $g=h$, что делает обе логарифмические кривые совершенно одинаковыми; положим начало абсцисс и логарифмов в точке A и приравняем AI величине

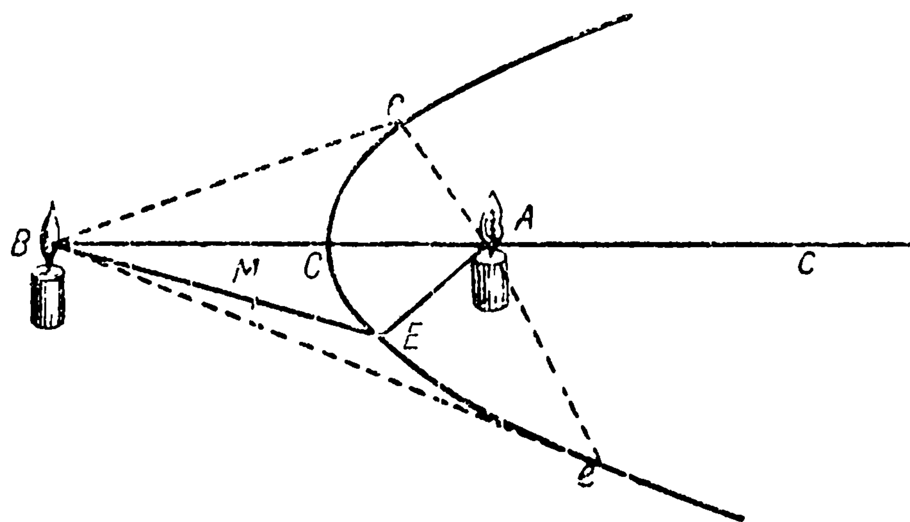
$$\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,p+\mathrm{Log}\,x+\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,i-\frac{1}{2}\mathrm{Log}\,q-\frac{gex}{2eh-2fh};$$

тогда нам остается лишь положить $IM = 2e - 2f$ и $MN = e$. Если мы затем проведем прямую INO, то последняя пересечет логарифмическую кривую в точке K, которая даст нам ординату KV, определяющую величину s, тогда как IS будет равно $\frac{e}{2e - 2f}s$, и все условия уравнения окажутся выполненными. Поскольку s найдено, а x — задано, величина $\frac{ex - es}{2e - 2f}$ укажет нам толщину, которую должно иметь прозрачное тело дабы произвести указанное действие.

ТРЕТЬЯ ЗАДАЧА

Два светящих тела A и B расположены на некотором расстоянии друг от друга в среде, повсюду одинаково прозрачной; требуется найти отношение, которое существует между их светами, когда последние воспринимаются в заданных точках „E“, „e“, и т. д., или, напротив, найти, в каких точках „E“, „e“, и т. д. надлежит воспринимать эти светы, если угодно, чтобы последние находились в некотором заданном отношении

Я обозначаю через a и b абсолютные силы света двух светящих тел A и B, а через p и u — силу, с которой они освещают в точке, например E, удаленной на расстояние $AE = m$ от первого светящего тела A и на расстояние $BE = z$ от второго тела B (фиг. 37).



Фиг. 37.

Поскольку абсолютные силы двух светильников A и B находятся в отношении a к b, их светы, если последние воспринимать на одном и том же расстоянии, будут находиться всегда в том же отношении, ибо они претерпевают подобное умень-

шение как вследствие недостатка прозрачности среды, так и вследствие расходимости лучей. Если, например, один из светов уменьшается на некотором расстоянии на половину, то другой свет уменьшится также на половину, и оба света будут поэтому неизменно находиться в одном и том же отношении a к b. Таким образом, если взять на линии BE участок BM, равный AE, и вспомнить, что мы обозначили через p силу света светильника A, воспринимаемую на расстоянии $AE=m$, то мы получим для света другого светильника B, воспринимаемого с того же расстояния в точке M, величину $\frac{bp}{a}$.[133]

Этот свет, сила коего в точке M выражается через $\frac{bp}{a}$, достигая точки E, имеет лишь силу u. Мы можем, следовательно, в согласии с тем, что было установлено ранее, и подобно тому, как мы поступали в предыдущих предложениях, умножить обе силы света $\frac{bp}{a}$ и u от светильника B, на квадраты соответствующих расстояний $BM=m$ и $BE=z$; тогда мы получим величины $\frac{bpm^2}{a}$ и uz^2 для двух ординат логарифмической кривой, выражающих полные количества света, достигающего точек, расположенных на различных расстояниях от светильника B.[134]

Если, однако, предположить, что логарифмы этих двух ординат берутся из обычных таблиц логарифмов и если вычесть меньший из них из большего, то мы получим следующую пропорцию: разность $\mathrm{Log}\frac{bpm^2}{a} - \mathrm{Log}\, uz^2$ логарифмов двух ординат $\frac{bpm^2}{a}$ и uz^2 относится к $ME=BE-BM=z-m$, то есть к интервалу, заключенному между ординатами, как подкасательная g таблицы логарифмов относится к подкасательной h логарифмической кривой прозрачной среды, в коей помещены оба светильника.[135] Эта пропорция дает нам

$$h\,\mathrm{Log}\frac{bpm^2}{a} - h\,\mathrm{Log}\, uz^2 = gz - gm$$

или

$$\mathrm{Log}\frac{bpm^2}{a}-\mathrm{Log}\,uz^2=\frac{g}{h}z-\frac{g}{h}m,$$

что сводится, в силу свойств логарифмов, к

$$\mathrm{Log}\frac{b}{a}+\mathrm{Log}\,p+2\,\mathrm{Log}\,m-\mathrm{Log}\,u-2\,\mathrm{Log}\,z=\frac{g}{h}z-\frac{g}{h}m.$$

РЕШЕНИЯ

I. Найти отношение светов, когда известно отношение расстояний до двух светящих тел.

Предыдущее уравнение является общим; оно может служить нам как в том случае, когда требуется найти отношение двух светов p и u при двух известных расстояниях AE и BE, так и в том случае, когда надо найти отношение этих расстояний при известном отношении светов. В первом случае, когда известны оба расстояния m и z, мы получаем, после преобразования

$$\mathrm{Log}\,p-\mathrm{Log}\,u=\frac{g}{h}z+2\,\mathrm{Log}\,z-\frac{g}{h}m-2\,\mathrm{Log}\,m-\mathrm{Log}\frac{b}{a}$$

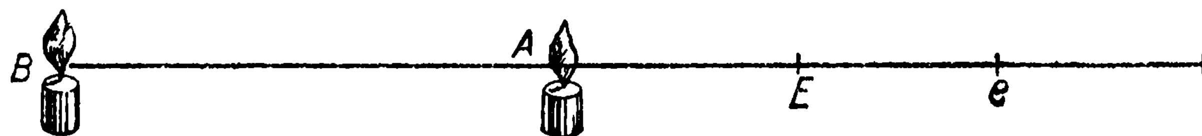
и, поскольку $\mathrm{Log}\,p-\mathrm{Log}\,u$ в силу свойств логарифмов равно $\mathrm{Log}\frac{p}{u}$, мы находим уравнение

$$\mathrm{Log}\frac{p}{u}=\frac{g}{h}z+2\,\mathrm{Log}\,z-\frac{g}{h}m-2\,\mathrm{Log}\,m-\mathrm{Log}\frac{b}{a},$$

выражающее в нашем случае логарифм искомого отношения двух светов p и u через полностью известные величины.

Когда два светящих тела расположены в двух фокусах гиперболы и когда наблюдатель находится на этой кривой, то отношение обоих светов выражается без помощи логарифмов. Ограничимся здесь лишь одним примером, заслуживающим особенного внимания. Допустим, что все точки E лежат на гиперболе, фокусы которой являются светящими телами; одно из главных свойств этой кривой заключается, как известно, в том, что все расстояния $BE=z$ превышают расстоя-

ния $AE = m$ на постоянную величину. То же самое будет справедливо, когда все точки E находятся на продолжении прямой BA, проходящей через оба светящих тела, как показано на фиг. 38.[136] Это свойство является общим как для



Фиг. 38.

прямой линии, так и для гиперболы, ибо эта кривая вырождается в прямую линию, когда ее действительная ось равна расстоянию между обоими ее фокусами. Если мы обозначим теперь через e постоянный избыток расстояний BE над расстояниями AE, то мы получим для величины z значение $e+m$ во всех точках E, и если мы введем эту величину в наше общее уравнение

$$\operatorname{Log}\frac{p}{u} = \frac{g}{h}z + 2\operatorname{Log}z - \frac{g}{h}m - 2\operatorname{Log}m - \operatorname{Log}\frac{b}{a},$$

что мы получим

$$\operatorname{Log}\frac{p}{u} = \frac{g}{h}(e+m) + 2\operatorname{Log}(e+m) - \frac{g}{h}m - 2\operatorname{Log}m - \operatorname{Log}\frac{b}{a},$$

что сведется к

$$\operatorname{Log}\frac{p}{u} = \frac{g}{h}e + 2\operatorname{Log}\frac{e+m}{m} - \operatorname{Log}\frac{b}{a}.$$ [137]

Это уравнение, однако, может быть преобразовано далее, ибо поскольку член $\frac{g}{h}e$ постоянен и известен, мы можем положить его равным логарифму некоторой величины f и получить

$$\operatorname{Log}\frac{p}{u} = \operatorname{Log}f + 2\operatorname{Log}\frac{e+m}{m} - \operatorname{Log}\frac{b}{a},$$

то сводится к

$$\operatorname{Log}\frac{p}{u} = \operatorname{Log}\left[\frac{fa}{b}\,\frac{(e+m)^2}{m^2}\right]$$

и, наконец, к формуле

$$\frac{p}{u}=\frac{fa'}{b}\frac{(e+m)^2}{m^2}$$

или

$$\frac{p}{u}=\frac{fa}{b}\frac{BE^2}{AE^2}.$$

Таким образом, когда мы получаем свет от двух светящих тел A и B (фиг. 38) и находимся либо в точке E, либо в точке e на продолжении прямой BA, проходящей через эти тела, либо на гиперболе CEe, фокусами которой являются эти тела, то мы видим, что отношение двух светов p и u выражается весьма простым образом без логарифмов. Прибавим, что достаточно даже определить однажды, с помощью какого-либо опыта, отношение обоих светов в произвольной точке E, чтобы получить без труда величину $\frac{af}{b}$, которая послужит затем к нахождению, с помощью вычисления, отношения обоих светов на всех остальных расстояниях.[138]

II. Найти отношение расстояний до двух светящих тел, когда известно отношение двух светов.

Положим теперь, что известно отношение двух светов p и u и требуется найти отношение расстояний m и z или определить все точки E, e и т. д. кривой CEe, в коих оба света находятся в заданном отношении (фиг. 37 и 39). Преобразуем прежде всего путем переноса членов наше общее уравнение

$$\mathrm{Log}\,\frac{b}{a}+\mathrm{Log}\,p+2\,\mathrm{Log}\,m-\mathrm{Log}\,u-2\,\mathrm{Log}\,z=\frac{g}{h}\,z-\frac{g}{h}\,m$$

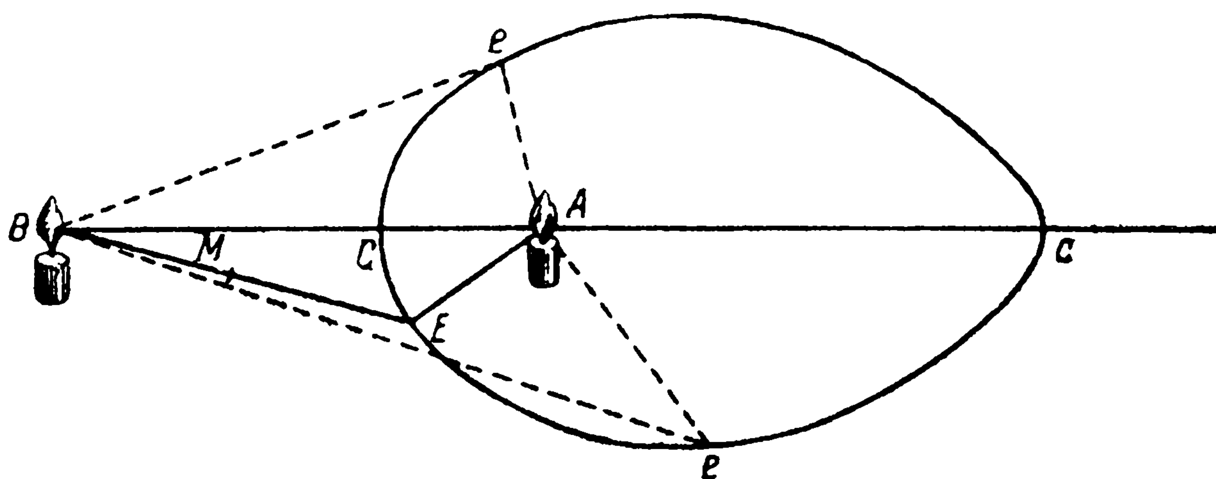
в уравнение

$$\frac{g}{h}\,z+2\,\mathrm{Log}\,z=\frac{g}{h}\,m+2\,\mathrm{Log}\,m+\mathrm{Log}\,\frac{b}{a}+\mathrm{Log}\,p-\mathrm{Log}\,u.$$

Если мы введем затем в это уравнение величину u, выраженную через p, взяв ее из особого уравнения, указывающего желаемое

отношение между обоими светами, то можно будет считать расстояние $AE = m$, равно как и силу p, которую имеет свет светильника A в точке E, известными. Решая уравнение относительно z, мы найдем расстояние BE от точки E до светильника B.

После этото остается лишь описать из точек A и B, как из центров, дуги окружностей с радиусами m и z; пересечение



Фиг. 39.

этих дуг определит искомую точку E. Если проделать то же самое для всех остальных расстояний $AE = m$, то можно найти все остальные точки, образующие кривую линию CEe. Этот способ найдет себе применение в нижеследующем примере.

Определить все точки „E“, „e“ и т. д., в которых силы светов („p“ и „u“) от двух светящих тел „A“ и „B“ находятся в постоянном отношении („c“ к „e“). Поскольку силы p и u света обоих светильников должны находиться в отношении c к e, мы получим для величины u значение $\frac{ep}{c}$ и, введя его в наше общее уравнение

$$\frac{g}{h} z + 2 \operatorname{Log} z = \frac{g}{h} m + 2 \operatorname{Log} m + \operatorname{Log} \frac{b}{a} + \operatorname{Log} p - \operatorname{Log} u,$$

получим уравнение

$$\frac{g}{h} z + 2 \operatorname{Log} z = \frac{g}{h} m + 2 \operatorname{Log} m + \operatorname{Log} \frac{b}{a} + \operatorname{Log} p - \operatorname{Log} \frac{ep}{c},$$

в котором неизвестным будет только z и которое сводится к

$$\frac{g}{h}z + 2\,\mathrm{Log}\,z = \frac{g}{h}m + 2\,\mathrm{Log}\,m + \mathrm{Log}\,\frac{b}{a} - \mathrm{Log}\,\frac{e}{c}\,.$$ [139]

Я разделяю правую и левую части уравнения на 2 и полагаю, для вящей простоты, что подкасательная g таблицы логарифмов равна подкасательной h логарифмической кривой, относящейся к среде, окружающей наши светильники. Я вправе сделать это предположение при условии, что буду затем искать логарифмы не по обычной таблице, а по той логарифмической кривой, подкасательная которой равна h. Тогда мы получим

$$\frac{1}{2}z + \mathrm{Log}\,z = \frac{1}{2}m + \mathrm{Log}\,m + \frac{1}{2}\mathrm{Log}\,\frac{b}{a} - \frac{1}{2}\mathrm{Log}\,\frac{e}{c}\,,$$

и нам остается лишь построить это уравнение, что возможно сделать, следуя способу, введенному нами в решении IV первой задачи.

Построим на оси AB (фиг. 36) логарифмическую кривую HDK, подкасательная которой равна h, и проведем ординату DC, равную m или расстоянию AE на фиг. 39.[140] Если мы затем примем точку A за начало логарифмов, то участок CA будет логарифмом m; и если мы положим $CS = \frac{1}{2}m$ и $SI = \frac{1}{2}\mathrm{Log}\,\frac{b}{a} - \frac{1}{2}\mathrm{Log}\,\frac{e}{c}$, то очевидно, что IA, которое будет состоять из $IS = \frac{1}{2}\mathrm{Log}\,\frac{b}{a} - \frac{1}{2}\mathrm{Log}\,\frac{e}{c}$, из $SC = \frac{1}{2}m$ и из $CA = \mathrm{Log}\,m$, будет равно $\frac{1}{2}m + \mathrm{Log}\,m + \frac{1}{2}\mathrm{Log}\,\frac{b}{a} - \frac{1}{2}\mathrm{Log}\,\frac{e}{c}$, то есть второму члену нашего уравнения. Таким образом, нам остается лишь провести из точки I линию IK, параллельную SD, и опустить из точки K ординату KV; эта последняя будет иметь искомую величину z. Отрезок VA будет логарифмом z, и очевидно, что, в силу параллельности IK и SD, участок IV будет равен половине VK или равен $\frac{1}{2}z$, точно так же, как SC будет равно половине DC. Отсюда следует, что IA, которое

мы сделали равным $\frac{1}{2}m + \mathrm{Log}\, m + \frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{b}{a} - \frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{e}{c}$, будет также равно $\frac{1}{2}z + \mathrm{Log}\, z$, и мы получим

$$\frac{1}{2}z + \mathrm{Log}\, z = \frac{1}{2}m + \mathrm{Log}\, m + \frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{b}{a} - \frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{e}{c}\cdot$$

Наконец, для того, чтобы найти любое желаемое число остальных значений m и z, достаточно взять на оси AB точки, подобные i и s, удаленные друг от друга на величину $\frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{b}{a} - \frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{e}{c}$; из этих точек s и i мы будем проводить линии sd и ik, параллельные SD, или такие, чтобы im было равно половине перпендикуляра mn; затем мы опустим из точек d и k две ординаты dc и kv, причем вторая из них будет иметь величину z, а первая — величину m. Именно поэтому достаточно, как мы уже указывали, описать на фигуре 39 из точек A и B, как из центров, дуги окружностей с радиусами m и z, дабы получить из пересечения этих окружностей бесконечное множество точек E, в которых свет светильника A будет находиться со светом светильника B в постоянном отношении c к e, что мы и хотели получить.[140]

Если угодно, чтобы два света представлялись всегда равными, то надлежит положить $c = e$, дробь $\frac{e}{c}$ становится при этом предположении равной единице, ее логарифм $\mathrm{Log}\frac{e}{c}$ равным нулю, а расстояние $\frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{b}{a} - \frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{e}{c}$ между точками I и S сводится к $\frac{1}{2}\mathrm{Log}\frac{b}{a}\cdot$ Таким образом, чтобы определить интервалы is или IS (фиг. 36), достаточно взять две ординаты HE и GF, дабы представить абсолютные силы b и a двух светильников и сделать is или IS и т. д. равным половине промежутка, отсеченного этими ординатами и равного $\mathrm{Log}\, b - \mathrm{Log}\, a = \mathrm{Log}\frac{b}{a}\cdot$

Замечания о различных признаках кривой „CEe“ (фиг. 37 и 39). Можно также заметить, что чем больше значения m и z,

равные cd и vk (фиг. 36), тем более избыток z над m; величина этого избытка должна, тем не менее, иметь границу, ибо параллельные sd и ik находятся всегда на одинаковом расстоянии друг от друга. В самом деле, очевидно, что этот избыток может стать лишь в два раза бо́льшим, нежели is, или равным $EF = \text{Log}\,\frac{b}{a}$, и то лишь на бесконечном расстоянии или когда логарифмическая кривая удаляется от своей оси совершенно перпендикулярно. Например, можно видеть, что vk не превосходит здесь cd на столь большую величину, ибо логарифмическая кривая удаляется наклонно к своей оси; если бы, однако, она удалялась от нее перпендикулярно, то vk превышало бы cd на всю величину расстояния в направлении перпендикулярном оси между параллельными sd и ik, причем это расстояние в два раза превосходит is или равно $\text{Log}\,\frac{b}{a}$, ввиду положения двух параллельных линий.

Приняв это, легко определить различные кривизны, которые должны иметь линии CEe на фигурах 37 и 39, сообразно большему или меньшему удалению светящих тел друг от друга. Если оба светильника A и B находятся очень близко друг к другу, так что расстояние между ними менее, чем $\text{Log}\,\frac{b}{a}$, то избыток z над m, все более и более возрастая, станет вскоре равным этому расстоянию BA; очевидно, что когда затем мы будем согласовывать величины $z = BE$ и $m = AE$, дабы найти некоторую точку E на кривой CEe, то мы найдем точку c, которая будет лежать, как на фиг. 39, на продолжении линии BA. Ясно также, что наша кривая линия будет иметь в этом месте конец, ибо все другие значения z и m, которые будут бо́льшими и разность которых будет превосходить BA, не смогут согласоваться или не будут в состоянии образовать вместе с AB треугольники AEB и смогут оказаться пригодными лишь для некоторого иного расположения светильников. Фиг. 39 изображает нам кривую CEe в этом первом случае.

Однако, если немного удалить оба светильника друг от друга, так, чтобы расстояние между нами стало равным $\mathrm{Log}\,\frac{b}{a}$ или в точности в два раза бо́льшим, чем расстояние *is* или *IS* на фиг. 36, то избыток *z* над *m* станет равным расстоянию *BA* между светильниками лишь в том случае, если *z* и *m* бесконечно велики. Таким образом, обе ветви кривой *CEe*, каждая из которых имеет точку перегиба, встречаются с прямой линией *BAc* лишь на бесконечном расстоянии, имея, следовательно, эту прямую линию своей асимптотой. Это — второй случай.

Мы имеем, кроме того, еще третий случай, когда расстояние *BA* между светильниками больше, чем двойное растояние *is* или *IS* на фиг. 36. В самом деле, избыток *z* над *m* будет при этом всегда менее, чем *BA*, откуда следует, что величины $z = BE$ и $m = AE$ можно согласовать между собою, дабы определить новые точки *E* на кривой *CEe* и, что, следовательно, ветви этой кривой будут непрерывно удаляться от прямой *BAc*, как на фиг. 37, почти так же, как гипербола удаляется от своей оси. Сравнение с гиперболою является здесь естественным, ибо наша кривая, действительно, становится гиперболою, когда на бесконечном расстоянии от двух светильников избыток *z* над *m* достигает величины $\mathrm{Log}\,\frac{b}{a}$ и перестает далее изменяться. Это очевидно для читателей, сведущих в природе гиперболы и знающих, что если взять расстояния от каждой из точек этой кривой линии до каждого из ее фокусов, то одно из этих расстояний будет всегда превышать другое на постоянную величину. Из того, что наша линия *CEe* сходна на бесконечном расстоянии с гиперболою, следует, что она имеет гиперболу в качестве асимптоты и что эту последнюю кривую линию легко определить, ибо нетрудно видеть, что ее фокусами являются светящие тела *A* и *B* и что ее действительная ось должна быть равна $\mathrm{Log}\,\frac{b}{a}$.

Кривая „CEe“ (фиг. 37 и 39) *имеет асимптоту лишь потому, что среда не является совершенно прозрачною.*

Наконец, прежде чем закончить этот раздел, мы заметим, что кривая CEe не была бы подвержена всем этим изменениям, если бы оба светильника A и B находились в совершенно прозрачной среде или если бы свет уменьшался лишь вследствие расхождения его лучей. Если вместо уравнения

$$\frac{1}{2} z + \operatorname{Log} z = \frac{1}{2} m + \operatorname{Log} m + \frac{1}{2} \operatorname{Log} \frac{b}{a} - \frac{1}{2} \operatorname{Log} \frac{e}{c}$$

исследовать уравнение, из которого оно было получено:

$$\frac{g}{h} z + 2 \operatorname{Log} z = \frac{g}{h} m + 2 \operatorname{Log} m + \operatorname{Log} \frac{b}{a} - \operatorname{Log} \frac{e}{c},$$

с тем, чтобы иметь возможность найти по логарифмической кривой, подкасательной которой является g, искомые логарифмы и чтобы иметь возможность рассматривать в натуральном виде другую логарифмическую кривую, принадлежащую прозрачному телу и имеющую h в качестве подкасательной, то окажется, что в рассматриваемом случае эта подкасательная h бесконечна, ибо подкасательные, как мы видели, пропорциональны удельным прозрачностям тел, и что среда, окружающая наши светильники, бесконечно прозрачна, то есть не вызывает ни малейшего изменения света.

Отсюда следует, что члены $\frac{g}{h} z$ и $\frac{g}{h} m$ нашего уравнения должны исчезнуть; таким образом уравнение сводится к

$$2 \operatorname{Log} z = 2 \operatorname{Log} m + \operatorname{Log} \frac{b}{a} - \operatorname{Log} \frac{e}{c},$$

что в свою очередь сводится к

$$2 \operatorname{Log} \frac{z}{m} = \operatorname{Log} \frac{bc}{ae}$$

и к

$$\operatorname{Log} \frac{z^2}{m^2} = \operatorname{Log} \frac{bc}{ae},$$

и, наконец, к

$$\frac{z^2}{m^2} = \frac{bc}{ae}$$

и

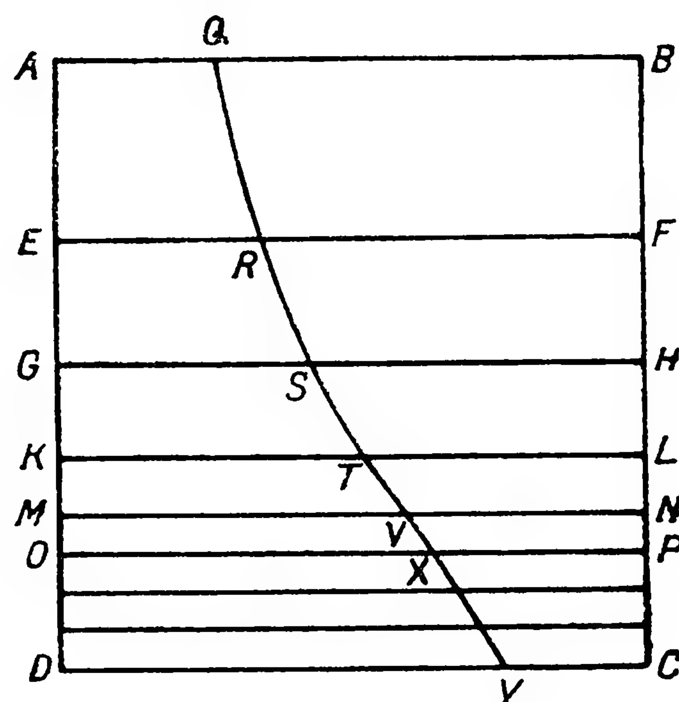
$$\frac{z}{m}=\sqrt{\frac{bc}{ae}}.$$

Отсюда мы можем видеть, что расстояния m и z точек E нашей кривой CEe до двух светильников A и B находятся всегда в постоянном отношении друг к другу, и что наша кривая линия является, таким образом, геометрическою. Кроме того, можно без особого труда убедиться, что этим свойством обладает лишь круг, как это можно также усмотреть в третьем примере восьмой книги о конических сечениях покойного г-на маркиза де Лопиталя.

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ОБ УМЕНЬШЕНИИ, ПРЕТЕРПЕВАЕМОМ СВЕТОМ, ПРОХОДЯЩИМ СКВОЗЬ ТЕЛА, НЕ ВЕЗДЕ ОДИНАКОВО ПЛОТНЫЕ

Мы перейдем теперь к градации света в средах, плотность которых не везде одинакова. Это новое изыскание не представит особой трудности, ибо естественно полагать, что бо́льшие или меньшие сгущения вызывают в неравномерно сгущенном теле в точности такое же действие в отношении задержания лучей, что и бо́льшие или меньшие толщины в теле, имеющем повсюду одну и ту же плотность. Свет может претерпевать равные изменения лишь встречая равное число частиц, способных задерживать лучи или рассеивать их; однако для того чтобы свет встречал равное число этих частиц, необходимо, чтобы он проходил сквозь меньшие или бо́льшие толщи, смотря по тому, насколько более или менее плотна среда.



Фиг. 40.

Отсюда следует, что если в прозрачном, неравномерно сгущенном теле *ABCD* (фиг. 40) расстояния *BF*, *FH*, *HL* равноценны толщинам *bf*, *fh*, *hl* (фиг. 31) совершенно однород-

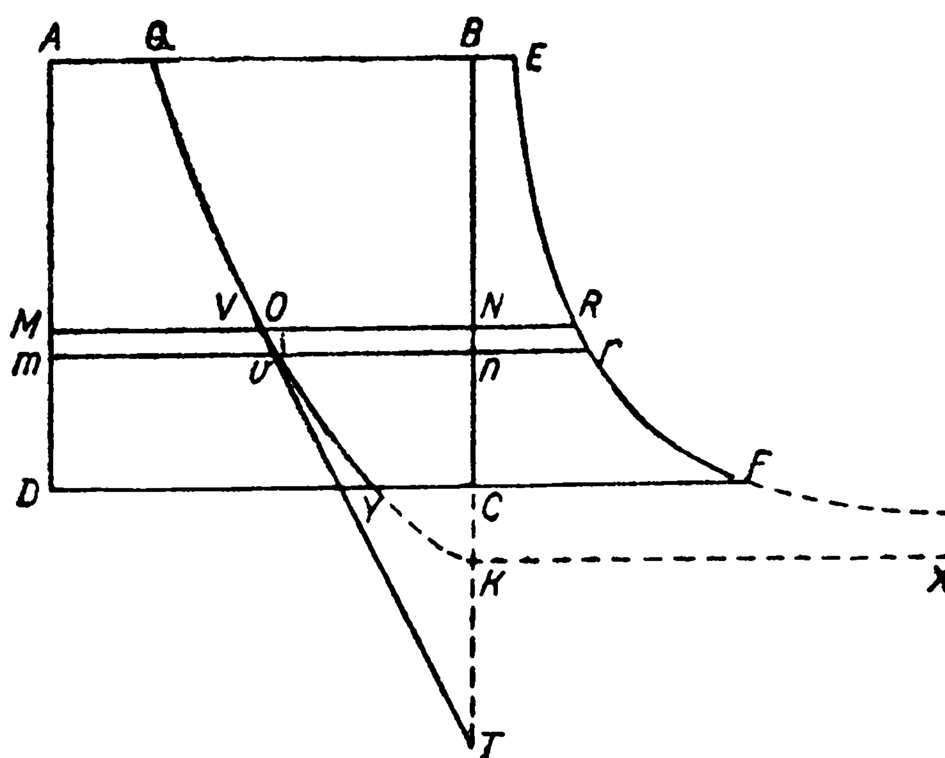
ного тела *abcd* или содержат то же количество частиц, обладающих тою же формою и тою же плотностью, то ординаты *RF*, *SH*, *TL* и т. д. кривой *QVY*, выражающей градацию света в теле *ABCD* или служащей его градулюцикою, будут в точности равны ординатам *rf*, *sh*, *tl* и т. д. логарифмической кривой *qvy*, выражающим силы света в совершенно однородном теле *abcd*.[141]

Таким образом, градулюцика *QVY* связана всегда с логарифмическою кривою, хотя она может ею и не быть. Очевидно, что она и не является ею, ибо ее ординаты не находятся на том же расстоянии друг от друга, на каком они находятся у логарифмической кривой; она, однако, всегда связана с последнею, поскольку ее ординаты всегда заключают между собою одинаковые массы частиц.

Отсюда надлежит сделать вывод, что в нашем случае пропорциональными разностям логарифмов различных количеств света являются не толщины *BF*, *FH*, *HL*, а массы вещества, содержащиеся в этих толщинах. Таким образом, мы имеем следующую общую пропорцию: *масса вещества, заключенная в некоторой толще BN или AM, относится к разности логарифмов двух количеств света QB и VN, как масса вещества, заключенная в любой другой толще BC к разности логарифмов количеств света QB и YC.* С помощью этой простой пропорции можно будет разрешить любые задачи, касающиеся градации света, коль скоро светящее тело расположено столь далеко, что лучи его можно полагать параллельными.

Одним словом, мы поступаем точно так же, как во втором разделе, если не считать особого внимания, уделяемого здесь массам вещества, пронизываемого светом, поскольку уменьшения, претерпеваемые последним, всецело зависят от этих масс. До сих пор мы пользовались лишь обыкновенными толщинами, однако они при этом также были пропорциональны количествам вещества, поскольку плотность среды была однородна.

Сказанное не нуждается в пояснении примерами, однако мы присовокупим сюда некоторые размышления о природе градулюцики. Во исполнение этого намерения проведем касательную VT (фиг. 41) в точке V градулюцики QVY тела $ABCD$; вообразим ординату vn бесконечно близкою ординате VN и проведем короткую линию vO, параллельную оси BC. Эта короткая линия будет равна толщине Mm или Nn слоя и отрежет от первой ординаты VN маленькую часть VO, выражающую небольшое уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении этого слоя.



Фиг. 41.

Наконец, представим себе на этой же оси BC другую, лежащую вовне кривую ERF, ординаты которой BE, NR, CF и т. д. выражают различные степени плотности тела AC в каждой точке; другими словами, первая ордината BE будет выражать сгущение в AB или количество частиц, расположенных в AB, а вторая ордината NR будет точно так же выражать массу частиц, расположенных в MN; отсюда следует, что сумма всех ординат BE, NR и т. д. или все пространство $BEFC$, охватываемое кривой ERF, будет выражать массу частиц, заключенных во всем теле $ABCD$; сегменты же, как, например, $BERN$, будут выражать массы вещества, содержащиеся в отдельных частях, например $ABNM$.

Исходя из сделанных предположений, мы можем доказать, что *в том случае, когда лучи света параллельны между собою и пронизывают среду, неравномерно сгущенную в последовательных слоях, то подкасательные градулюцики будут в каждой точке обратно пропорциональны плотно-*

стям или, что сводится к тому же, прямо пропорциональны разреженностям.

Небольшое уменьшение VO, претерпеваемое светом при прохождении слоя $MNnm$, зависит от трех обстоятельств: от количества VN света, которому предстоит пройти сквозь этот слой, от плотности NR и от толщины слоя Nn. Ясно, что это уменьшение зависит от количества света VN, ибо, при прочих равных условиях, чем большему количеству лучей предстоит пройти сквозь среду, тем большее число из них пройдет ее в действительности и тем большее их число будет задержано. Это небольшое уменьшение VO зависит также от плотности NR и от толщины Nn, ибо чем бóльшими являются эта плотность и эта толщина, тем большее число частиц оказывается на пути света.

Таким образом, мы видим, что уменьшение VO должно быть всегда пропорциональным произведению $VN \times NR \times Nn$, и мы можем положить его равным этому же произведению, деленному на некоторую постоянную величину a^2. Подобие же маленького треугольника VOv и большого треугольника VNT дает нам пропорцию $VN : NT :: VO : Ov = Nn$, из которой следует уравнение:

$$NT \times VO = VN \times Nn;$$

если ввести в это уравнение вместо маленького уменьшения VO величину $\frac{VN \times NR \times Nn}{a^2}$, то мы получим

$$\frac{NT \times VN \times NR \times Nn}{a^2} = VN \times Nn,$$

что сводится к

$$NT \times NR = a^2,$$

откуда мы видим, что подкасательная градулюцики NT, умноженная на соответствующую ординату NR кривой ERF, дает всегда постоянную величину a^2; поэтому подкасательные NT будут обратно пропорциональны плотностям NR.[142]

ГЛАВА I

О том, что кривая различных плотностей среды может быть легко построена, коль скоро известна градулюцика этой среды

Итак, если бы было известно, в какой мере свет уменьшается в некоторой среде, или если бы были известны свойства градулюцики QVY, то было бы очень просто построить кривую ERF геометрически или найти закон, которому следуют сгущения. Коль скоро известна градулюцика QVY, мы получим все подкасательные; обратные им величины дадут ординаты кривой ERF.

Если, например, свет уменьшается таким образом, что его силы выражаются ординатами части параболы, вершина которой K, а ось которой BK, то какого бы рода ни была эта парабола, ее подкасательные будут всегда пропорциональны абсциссам или отрезкам оси KN, ибо в этом заключается одно из свойств, общих всем этим кривым линиям; поэтому ординаты кривой ERF, обратные подкасательным градулюцики, будут также обратны отрезкам NK оси.[143] Отсюда следует, что кривая плотностей ERF будет частью гиперболы, центром которой будет K, а одною из асимптот — прямая BK.

В качестве второго примера положим, что свет убывает в геометрической прогрессии или что градулюцика является логарифмическою кривою. Тогда все ординаты кривой ERF, которые должны быть обратны подкасательной, будут равны между собою. Отсюда следует, что, впрочем, нам уже известно, что среда должна быть в этом случае повсюду одинаково плотной.

О том, что для проведения градулюцики можно пользоваться логарифмами, если известны различные плотности среды. Найти этим способом свойства кривой ERF всегда просто, коль скоро известна градулюцика QVY; обратная проблема труднее; иначе говоря, сложнее определить свойства градулюцики, зная плотности. В этом случае следует прибегнуть

к так называемой обратной методе касательных. Зная плотности, мы можем составить пропорцию, коей следуют подкасательные градулюцики; после этого, однако, необходимо определить кривую с помощью ее подкасательных. Если градулюцика окажется одной из геометрических линий, то можно будет решить все вопросы, касающиеся силы света, геометрическим путем, поскольку соотношение между ординатами и абсциссами или соотношение между силами света и различными толщинами среды будет при этом известно в точном и конечном виде. Однако более общий и практически более удобный способ заключается в разыскании масс вещества, пронизываемых лучами, или нахождении площади сегментов *BERN*, *BEFC* и т. д. кривой плотностей (что всегда возможно сделать хотя бы в приближении); после этого ординаты градулюцики могут быть получены с помощью таблицы логарифмов из пропорции, указанной выше.

Если мы захотим образовать эту пропорцию заново, то нам достаточно будет обозначить через x переменные толщины *BN* среды, через z плотности *NR*, и через y соответствующие силы света *VN*. Дифференциальное исчисление дает нам для подкасательных *NT* выражение $\frac{ydx}{dy}$, и, поскольку эти подкасательные обратно пропорциональны плотностям z или, иначе говоря, первые величины, будучи умножены на вторые, должны всегда давать постоянное произведение, то мы получим выражение $a^2 = \frac{zydx}{dy}$, из которого следует

$$\frac{a^2\,dy}{y} = zdx,$$

то есть уравнение с разделенными переменными, выражающее в общем виде соотношение между градулюцикою *QVY* и кривою плотностей *ERF*. Первый член этого уравнения $\frac{a^2\,dy}{y}$ является логарифмическим дифференциалом, интеграл которого есть $a^2 \operatorname{Log} y$, а второй член zdx выражает маленькие элементарные

трапеции $NRrn$ кривой плотностей или массы вещества, содержащиеся в маленьких толщах $Nn = dx$.[144] С помощью интегрирования мы можем, следовательно, найти, в согласии с уже доказанным, что логарифмы различных сил света пропорциональны сегментам $BERN$ или массам вещества, пронизываемым лучами.

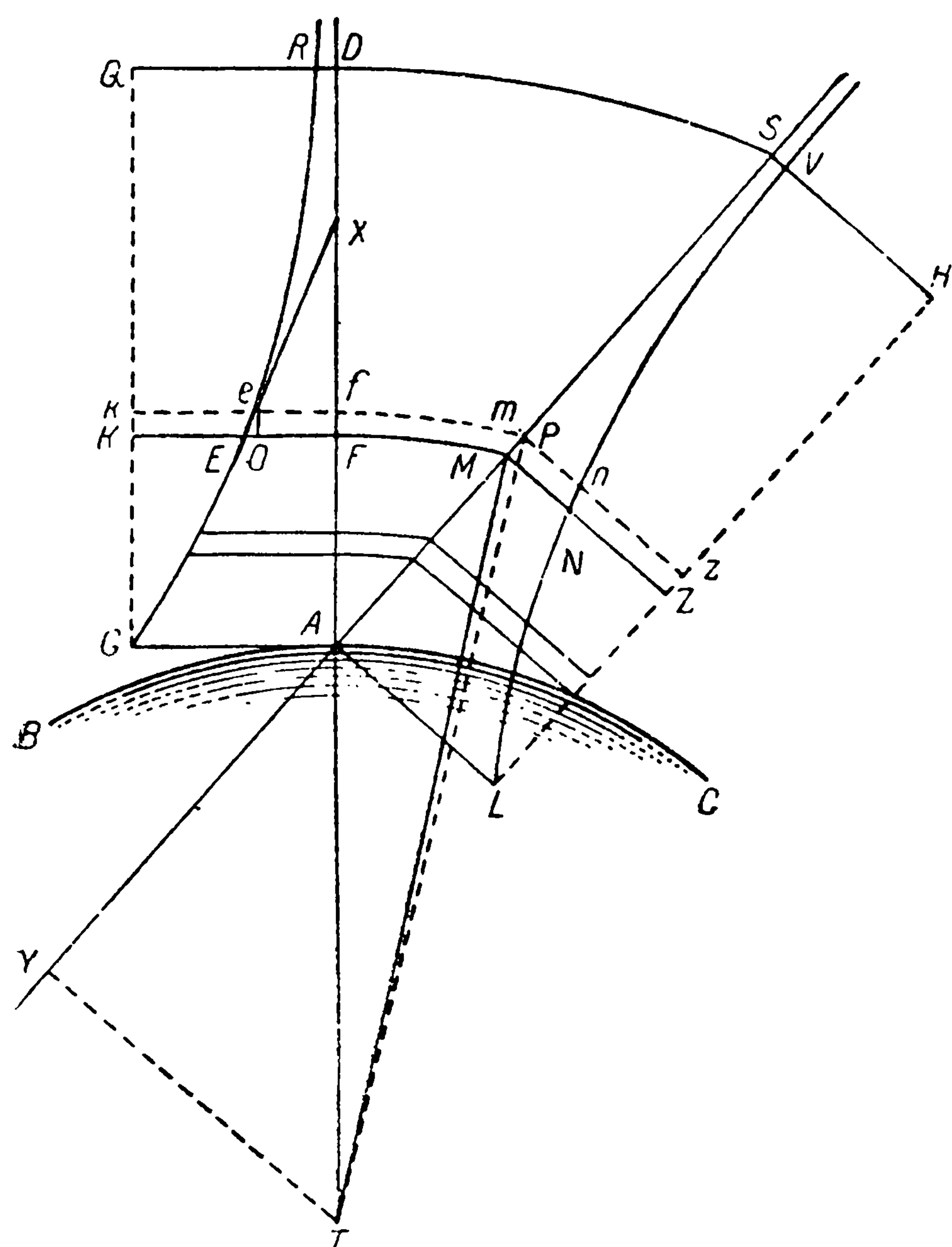
Наконец, очевидно, что ординаты кривой QVY будут выражать силы или яркости света в тех случаях, когда светящие тела находятся на очень большом удалении и когда их лучи существенно параллельны, ибо силы света в этом случае пропорциональны количествам лучей, прошедшим, не будучи задержанными. Если, однако, светящие тела расположены слишком близко, чтобы их лучи можно было считать параллельными, то хотя ординаты VN YC и т. д кривой QVY и будут попрежнему выражать количества света, достигающие каждой точки, эти количества будут, однако, распределены по бо́льшим пространствам, и свет будет, поэтому, в соответствующей мере ослаблен. Таким образом, QVY уже не будет в этом случае градулюцикою, ибо QVY выражает лишь те уменьшения, которые причиняются недостатком прозрачности среды, в то время как свет уменьшается также и вследствие расхождения лучей. По этой причине следовало бы делить ординаты QVY на квадраты расстояний до светящего тела, дабы получать в этом случае ординаты градулюцики. Мы можем не останавливаться на этом более подробно.

ГЛАВА II

О прозрачности атмосферы

Мы можем приложить вышеизложенную теорию к атмосфере. Для этой цели мы рассмотрим сначала вопрос о том, каковы плотности на различных высотах; мы будем искать массы воздуха, пронизываемого лучами света, приходящего от небесных светил; все остальное мы довершим с помощью таблиц логарифмов.

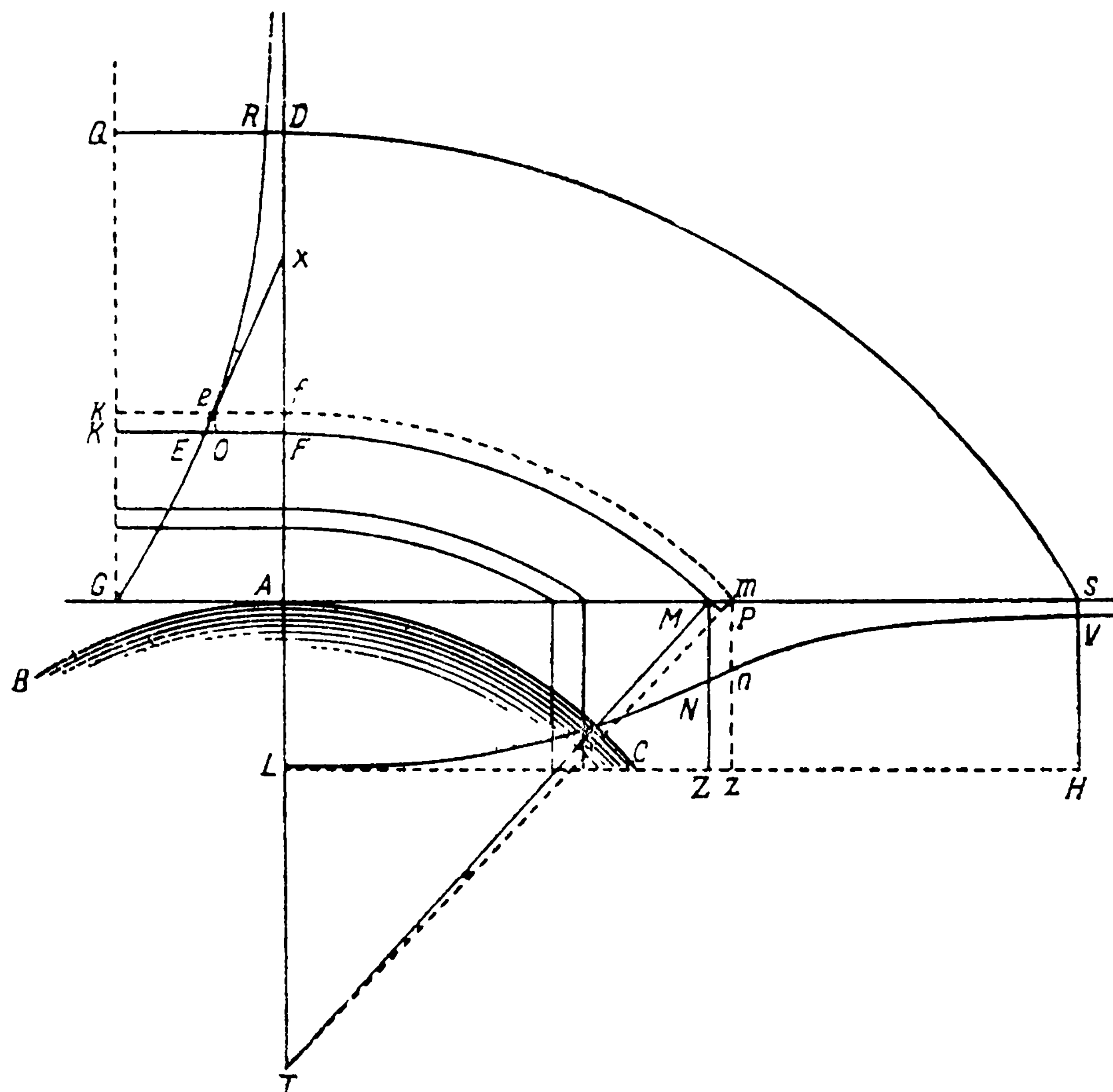
Плотности атмосферы на различных высотах над уровнем моря. Пусть BAC (фиг. 42 и 43) есть часть поверхности земли, центр которой обозначим через T. Положим, что наблюдатель находится в A и вообразим на вертикали AD кривую GER, ординаты которой AG, FE и DR выражают плотности воздуха во всех местах атмосферы; GA означает плотность воздуха у поверхности земли; EF означает плотность воздуха на высоте AF над землею, и так далее. Все пространство $AGERDA$, заключенное между кривою и ее осью, выражает, следовательно, массы всего воздуха, находящегося над уровнем моря, подобно тому, как пространство $REFD$ означает количества воздуха, находящегося над точкою F.



Фиг. 42.

Мы воспользуемся для начала в этом вопросе системой г-на Мариотта, который полагает сгущенности воздуха в точности пропорциональными давлениям, действующим на него;[145] другими словами, если масса воздуха, выражаемая пространством $DAGR$ в два или в три раза более массы, выражаемой $DFER$, то плотность воздуха в A будет в два или три раза более плотности в F, или, что то же, GA будет в два или три раза более EF. Тогда кривая GER будет логарифмическою кривою, ибо известно, что одним из свойств этой кривой, и притом свойством, присущим ей одной, является то, что про-

странства $DAGR$ и $DFER$, лежащие над ординатами GA и EF и простирающиеся на бесконечную высоту, равны произведениям этих ординат на подкасательную; отсюда следует, что пространства $DAGR$ и $DFER$ относятся друг к другу как ординаты



Фиг. 43.

GA и EF, поскольку подкасательная остается всегда одной и той же.[146]

Это свойство зиждется на том, что маленькие треугольники EOe неизменно пропорциональны большим треугольникам EFX, образованным ординатами, касательными EX и постоянными подкасательными FX. Каждая маленькая трапеция или элементарный прямоугольник $EFfe$, равный произведению Oe или Ff на ординату EF, неизменно равен прямоугольнику, являющемуся произведением подкасательной FX на EO. Таким образом, остается лишь взять достаточно большую сумму

маленьких трапеций или элементарных прямоугольников Ef, дабы образовать большую логарифмическую область $EFDR$, которая будет равна прямоугольнику, являющемуся произведением подкасательной на избыток всей ординаты EF над ординатою RD; этот избыток будет образован равным числом маленьких избытков EO. Вся логарифмическая область, лежащая над EF или GA, будет по этой же причине равна произведению подкасательной логарифмической кривой на ординату EF или GA.

Недостаточно, однако, знать, что кривая плотностей GER является логарифмическою кривою; нам необходимо знать, какого вида эта кривая или что ее отличает от всех других кривых. Естественнее всего сделать это, разыскав величину ее подкасательной. Поскольку в Круазике нет ни гор, ни возвышений, которые позволили бы мне проделать опыты с барометром, я воспользовался вначале наблюдениями, сделанными покойным г-ном де ла Гиром в Провансе на Мон-Клере.

Этот ученый заметил, что на уровне моря высота ртути составляла 28 дюймов 2 линии, а на вершине горы, возвышающейся на 257 туаз, ртуть имела высоту лишь в 26 дюймов $4^1/_2$ линии. Поскольку высоты ртути 28 дюймов 2 линии и 26 дюймов $4^1/_2$ линии пропорциональны давлению воздуха, то ординаты GA и EF, также пропорциональные этим давлениям, будут в том же отношении, как и высоты ртути. Таким образом, если AF представляет высоту Мон-Клере, равную 257 туазам, ординаты AG и FE будут относиться, как 28 дюймов 2 линии к 26 дюймам $4^1/_2$ линиям, или как 338 к $316^1/_2$. Узнав, таким образом, отношение двух ординат AG и FE логарифмической кривой GER, мы можем составить пропорцию, разобранную в четвертой задаче второго раздела, дабы найти подкасательную FX. Мы имеем: 285433, то есть разность логарифмов 338 и $316^1/_2$, относится к AF, равному 257 туазам, как подкасательная таблицы логарифмов 4342948 к приблизительно 3911 туазам; таким образом, подкасательная FX логарифмической кривой, ординаты коей выражают в системе г-на Мариотта

любые сгущенности атмосферы, составляет, примерно, 3911 туаз.

Когда я в конце 1727 года писал эти строки, я не мог предвидеть, что мне приведется взбираться на высочайшие горы земного шара и производить там множество наблюдений, позволяющих определить с бо́льшею точностью логарифмическую кривую, ординаты коей выражают различные плотности атмосферы. Я не только восходил, с барометром в руке, на высочайшие из доступных гор в Перуанских Кордильерах; я спустился затем умышленно к Южному морю,[147] оставался в течение полутора месяцев на пустынном острове, дожидаясь возможности измерить геометрическим путем абсолютную высоту тех возвышенных точек, на коих я делал свои наблюдения.

В то время как в нижней части атмосферы сгущенности воздуха весьма изменчивы, на высоте свыше 7 или 8 сотен туаз они почти совершенно постоянны; барометр показывает там изменения лишь в полторы линии, а на бо́льшей высоте даже в одну линию, и подкасательная логарифмической кривой составляет там примерно 4197 туаз. Из этого обстоятельства я вывел некое правило, которое я смог подтвердить на 40 или 50 примерах, позволяющее определить с помощью барометра высоту самых больших гор. Я полагаю, что большинство читателей не посетует, если я воспользуюсь представляющимся в этом месте случаем пролить новый свет на кое-что из того, о чем уже говорилось ранее.[148]

Правило, позволяющее найти с помощью барометра высоту наиболее высоких гор. Не следует, как это неизменно делалось доныне, брать уровень моря в качестве начальной точки, поскольку высота ртути в барометре слишком сильно меняется вблизи этого уровня.

Гораздо лучше выбирать для сравнения места значительно более высокие, на которых были произведены точные наблюдения, и определять затем, насколько другие горы менее высоки, чем эти. Я воспользовался опытами, произведенными мною

с величайшею тщательностью на горе, называемой Пичинша, которая находится вблизи Квито и возвышается над этим городом; она достаточно высока, чтобы достигнуть нижнего края вечных снегов, которые простираются вдоль всего жаркого пояса на известной высоте, превышающей 2400 туаз, считая от уровня моря. Ртуть в барометре стояла там на высоте в 15 дюймов 11 линий, и я нашел геометрическим путем, что высота этой горы равна 2434 туаз. Не составляет никакого труда сопоставлять с нею высоту всех других весьма высоких гор, на которых совершались какие-либо наблюдения с барометром.

Я полагаю, что высоты ртути во второй и в первой точках наблюдения относятся как ординаты EF и RD, поскольку эти ординаты пропорциональны лежащим выше логарифмическим областям или суммам плотностей (фиг. 42). Если, следовательно, взять из обычных таблиц логарифмы EF и RD, то их разность будет в точности равна величине DF, выражающей, насколько вершина второй горы ниже вершины Пичинши, коль скоро логарифмическая кривая таблицы логарифмов в точности совпадает с логарифмическою кривою GER атмосферы. Свести же их одну к другой очень просто. Можно заметить, что если вычеркнуть три последних цифры из подкасательной 4342948 таблицы логарифмов и уменьшить оставшееся число на одну тридцатую часть, то получится 4197, то есть значение другой подкасательной, выраженное в туазах. Остается лишь, следовательно, произвести такие же изменения в логарифмах таблицы, дабы получить логарифмы, соответствующие логарифмической кривой нашей атмосферы. Взяв затем разность DE того и другого логарифма, мы будем знать, насколько первая гора выше второй, то есть насколько Пичинша выше всех остальных высоко расположенных точек, в которых мы пользовались барометром.

Мне остается, таким образом, выразить высоту ртути в линиях и разыскать логарифм этой высоты в обычной таблице логарифмов, взяв из нее также логарифм 191 линии, то

есть высоты ртути на Пичинще. Я вычитаю один логарифм из другого и затем, дабы превратить искусственные логарифмы, даваемые таблицей, в естественные, соответствующие атмосфере, я опускаю три последних цифры в только что найденной разности и уменьшаю на одну тридцатую часть оставшееся слева число, получая, таким образом, величину DF, то есть избыток высоты Пичинши над высотой горы, о которой идет речь.

Так, например, высота ртути, наблюденная на Тенерифском пике, составляет 209 линий. Логарифм этого числа равен 2.3201463, а логарифм 191 линии, относящийся к вершине Пичинши, составляет 2.2810334. Если бы подкасательная таблицы логарифмов совпадала с FX, равной 4197 туазам, то разность последних двух логарифмов, равная 391129, выражала бы величину DF, в то время как DR была бы пропорциональна высоте ртути на Пичинше, а FE — высоте ртути на пике. Дабы свести одну разность к другой, мы опускаем три последних цифры в 391129 и уменьшаем на одну тридцатую часть остающееся слева число 391; отсюда мы получаем для DF 378 туаз, которые необходимо вычесть из высоты Пичинши, равной 2434 туазам, и находим высоту Тенерифского пика равной 2056 туазам.* Правда, Фейе[149] утверждает, что эта высота равна 2213 туазам (см. Мемуары Академии за 1746 г.); я показал, однако, в начале книги о фигуре Земли, что сей наблюдатель ошибся в сторону преувеличения на 140 или 150 туаз вследствие дурного расположения, приданного им его базе.**

* В Философских записках за 1752 г. можно прочесть, что доктор Томас Геберден, отмерив на берегу моря достаточную базу, нашел высоту пика равной 2566 английским туазам (фезомам); это наблюдение было подтверждено двумя последующими другими наблюдателями, а также двумя измерениями, произведенными за несколько лет до того г-ном Кроссом, английским консулом. Эти 2566 английских туаз равны $2408^1/_2$ туазам Chatelet de Paris. (*Примечачие издателя*).

** Здесь следует заметить, что Фейе, не будучи в состоянии взобраться на вершину пика, не имел возможности произвести лично опыт с барометром. (*Примечание издателя*).

Есть все основания полагать, что подкасательная FX логарифмической кривой, отвечающей разрежениям в верхних частях атмосферы, равна, с достаточною точностью, 4197 туазам по всей поверхности нашей планеты; отсюда следует, что и логарифмическая кривая является одною и тою же и что каждый слой воздуха, начиная с некоторой высоты, имеет одну и ту же плотность во всех точках кругом земного шара, ибо наше правило превосходно оправдывается во Франции, несмотря на ее значительную удаленность от жаркого пояса, если только применять это правило к самым высоким горам. По особым причинам, однако,* надлежит, пользуясь барометром с трубкою, внутренним диаметром, приблизительно в три линии, довольствоваться тщательною очисткою ртути без подогревания оной.

О различных массах воздуха, сквозь который должны проходить лучи небесных светил, чтобы достигнуть нас. Когда светило находится в зените, его лучи должны, прежде чем достигнуть наших глаз, пройти всю массу воздуха, находящуюся на вертикали AD и изображаемую пространством $RGAD$; когда же лучи воспринимают в F, то они проходят лищь сквозь массу, выражаемую $REFD$, то есть суммою всех плотностей верхних слоев. Однако если предположить, что светило не столь высоко, и что оно кажется нам находящимся на некоторой линии AMS, то для того, чтобы определить массу воздуха, сквозь которую проходит свет, нам надлежит перенести ординаты кривой GER на линию AS, откладывая их там перпендикулярно; таким способом мы получим новую кривую LNV, отличную от первой, и искомая масса воздуха будет выражаться областью $ALNVSA$ (фиг. 42).

---

* Причина этому лежит в том, что в своих наблюдениях над высотою ртути, которые г-н Бугер производил в Перу и которые послужили установлению его правила, он довольствовался устранением наиболее крупных пузырьков воздуха путем переменного переворачивания трубки и собиранием наиболее мелких пузырьков с помощью железной проволочки. (*Примечание издателя*).

Очевидно, что кривая LNV будет отлична от первой кривой, ибо, хотя точки M и S удалены от центра земли на те же расстояния, что и точки F и D, а ординаты MN и SV равны ординатам FE и DR, эти ординаты отложены у разных кривых на различных расстояниях вдоль осей AS и AD. Действительно, достаточно представить себе AD разделенною мысленно на бесконечное множество малых частей, равных Ff, чтобы заметить, что соответствующие малые части Mm на оси BS второй кривой не были равны друг другу. Части Mm будут тем большими, чем ближе к точке A они взяты; то есть относительное возрастание пути луча света в нижней части атмосферы много больше, чем в верхней части. Таким образом, массы воздуха $ALVS$ и $AGRD$ не будут пропорциональны длине путей SA и DA.

Дабы представить в общем виде, и не ограничиваясь рассмотрением кривой GER (фиг. 42) как логарифмической кривой, отношение между всеми этими массами воздуха, мы обозначим через a радиус TA земли и, опустив TY перпендикулярно лучу света SA, продолженному в направлении Y, обозначим через b синус AY угла ATY, равного кажущейся высоте светила, поскольку он является углом, дополнительным к углу TAY, мерой которого служит расстояние от светила до зенита; мы обозначим через x абсциссы или переменные части AF высоты атмосферы по вертикали, что даст нам величину $a+x$ для переменных расстояний FT или MT до центра T земли; наконец, обозначая через единицу первую ординату AG, указывающую плотность, которую имеет воздух у поверхности земли, мы примем величину $1-z$ за выражение всех других плотностей EF, RD и т. д. или MN, SV и т. д. Это означает, что если GQ параллельна AD, а LH параллельна AS, то z выражает KE, QR и т. д. или ZN, HV и т. д.

Сделав эти предположения, мы получим для величины YM выражение $\sqrt{a^2+2ax+x^2-\overline{TY}^2}=\sqrt{\overline{TM}^2-\overline{TY}^2}$; если мы обратим внимание на то, что $a^2-\overline{TY}^2$ или $\overline{TA}^2-\overline{TY}^2$ равняется $\overline{YA}^2=b^2$, то нам будет достаточно подставить b^2 вместо

$a^2 - \overline{TY}^2$ в выражение $\sqrt{a^2 + 2ax + x^2 - \overline{TY}^2}$, чтобы свести последнее к $\sqrt{b^2 + 2ax + x^2}$, которое будет равно величине YM. Теперь я беру дифференциал от величины $\sqrt{b^2 + 2ax + x^2}$, который дает мне $\frac{adx + xdx}{\sqrt{b^2 + 2ax + x^2}}$ для выражения маленькой части Mm, соответствующей маленькой части $Ff = dx$, отсекаемой теми же дугами круга FM, fm.

После того как маленькая часть Mm найдена, ясно, что если мы умножим ее на $MN = FE = 1 - z$, то мы получим $\frac{(1 - z)(a + x)\,dx}{\sqrt{b^2 + 2ax + x^2}}$ для маленькой трапеции $MmnN$, выражающей массу воздуха, содержащуюся на бесконечно малом пути Mm и являющейся элементом области $ALVS$. Таким образом, эта область равна $\int \frac{(1 - z)(a + x)dx}{\sqrt{b^2 + 2ax + x^2}}$, однако найти этот интеграл в действительности невозможно, если только не известны частные свойства кривой GER и не известно отношение между ее абсциссами x и ее ординатами $1 - z$. Если это отношение известно, величину $\frac{(1 - z)(a + x)\,dx}{\sqrt{b^2 + 2ax + x^2}}$ можно свести к величине, содержащей лишь одну переменную, после чего всегда можно найти, по крайней мере путем приближений, интеграл

$$\int \frac{(1 - z)(a + x)\,dx}{\sqrt{b^2 + 2ax + x^2}}.$$

Следует заметить, что мы пренебрегаем здесь кривизною, которую лучи света приобретают вследствие рефракции, хотя эта кривизна делает их несколько более длинными. Очевидно, что астрономическая рефракция слишком мала, чтобы отношение синуса падения к синусу преломления было сходно с отношением плотностей воздуха. Рефракция, несомненно, следует другому отношению и, быть может, вызывается особым веществом, разлитым в атмосфере, как это уже предполагалось некоторыми авторами. Если обозначить через u сгущенности этой особой материи на различных высотах x над землею,

через k ее наибольшее сгущение, которое должно получаться у поверхности земли, а через c синус дополнения до кажущегося возвышения светила, то мы сможем доказать, что при этом маленькая часть Mm луча света SA будет вместо $\frac{(a+x)\,dx}{\sqrt{b^2+2ax+x^2}}$ равна $\frac{u\,(a+x)\,dx}{\sqrt{a^2u^2+2axu^2+x^2u^2-c^2k^2}}$. Если умножить теперь это значение Mm на плотности $1-z$ воздуха, то мы получим для маленькой элементарной трапеции $MmnN$ значение

$$\frac{u\,(1-z)\,(a+x)\,dx}{\sqrt{a^2u^2+2axu^2+x^2u^2-c^2k^2}}.$$

Однако этот новый подход усложняет задачу, тем более что оказывается чрезвычайно трудным найти соотношение, коему следуют сгущенности u преломляющего вещества; кроме того, поскольку наибольшая астрономическая рефракция не достигает даже двух третей градуса, мы не улучшим существенным образом точность нашего расчета. По этой причине мы будем пренебрегать рефракцией и будем продолжать пользоваться величиною $\int\frac{(1-z)\,(a+x)\,dx}{\sqrt{b^2+2ax+x^2}}$ в качестве выражения масс воздуха, пронизываемых лучами небесных светил, при всех возвышениях над горизонтом.

Поскольку это выражение не зависит ни от какой системы и является совершенно общим, следует придать ему иной вид, дабы иметь возможность воспользоваться им. Мы имеем веские основания считать, что плотности атмосферы на различных высотах следуют ординатам логарифмической кривой, подкасательную коей нам удалось определить. Обозначим эту линию через f; поскольку высшая геометрии дает нам

$$dx=f\,dz+fz\,dz+fz^2\,dz+fz^3\,dz+\ldots,$$

мы получим бесконечное уравнение

$$x=fz+\frac{1}{2}fz^2+\frac{1}{3}fz^3+\frac{1}{4}fz^4+\ldots,$$

выражающее отношение между абсциссами $AF=x$ и ординатами $FE=1-z$.[150] Мы имеем, следовательно, для величины $a+x$ или TF значение

$$a+fz+\frac{1}{2}fz^2+\frac{1}{3}fz^3+\ldots$$

и для величины $b^2+2ax+x^2$ или $\overline{YM^2}$ значение

$$b^2+2afz+(af+f^2)z^2+\left(\frac{2}{3}af+f^2\right)z^3+\ldots$$[151]

Возвышая последнее выражение в степень с показателем $-\frac{1}{2}$, мы получим для $(b^2+2ax+x^2)^{-\frac{1}{2}}$ или $\frac{1}{\sqrt{b^2+2ax+x^2}}$ выражение:

$$\frac{1}{b}-\frac{afz}{b^3}+\frac{\frac{3}{2}a^2f^2-\frac{1}{2}ab^2f-\frac{1}{2}b^2f^2}{b^5}z^2-$$

$$-\frac{\frac{5}{2}a^3f^3+\frac{3}{2}a^2b^2f^2+\frac{3}{2}ab^2f^3-\frac{1}{2}ab^4f-\frac{1}{2}b^4f^2}{b^7}z^3+\ldots$$

Если ввести теперь все эти величины в элемент $\frac{(1-z)(a+x)\,dx}{\sqrt{b^2+2ax+x^2}}$ масс воздуха, то мы получим

$$\frac{af\,dz}{b}-\frac{a^2f^2-b^2f^2}{b^3}z\,dz+$$

$$+\frac{\frac{3}{2}a^3f^3-\frac{1}{2}a^2b^2f^2-\frac{3}{2}ab^2f^3+\frac{1}{2}b^4f^2}{b^5}z^2\,dz+\ldots,$$

и интегрируя почленно, будем иметь бесконечный ряд

$$\frac{afz}{b}-\frac{\frac{1}{2}a^2f^2-\frac{1}{2}b^2f^2}{b^3}z^2+$$

$$+\frac{\frac{1}{2}a^3f^3-\frac{1}{6}a^2b^2f^2-\frac{1}{2}ab^2f^3+\frac{1}{6}b^4f^2}{b^5}z^3,$$

выражающий, следовательно, значение величины

$$\int \frac{(1-z)(a+x)\,dx}{\sqrt{b^2+2ax+x^2}}$$

или областей $SALV$, представляющих массы воздуха, пронизываемые доходящим до нас светом небесных светил.[152]

Таким образом, достаточно подставить в этот ряд вместо a — радиус земли, вместо b — синус AY кажущегося возвышения светила, вместо f — подкасательную FX, вместо z — единицу, дабы получить массу воздуха, лежащую вдоль луча света SA.

Мы должны подставить вместо z единицу, поскольку ордината $RD=1-z$ логарифмической кривой GER обращается на бесконечно удаленном расстоянии в нуль, что может иметь место лишь в том случае, если z равно 1. Если полагать z равным лишь некоторой доле единицы, например ZN или HV, то будет получаться масса воздуха, лежащая не вдоль всего луча, а лишь вдоль его частей AM или AS.

Когда светило находится в зените, синус $AY(b)$ оказывается равным радиусу $AT(a)$ и в этом случае все члены ряда

$$\frac{afz}{b} - \frac{\frac{1}{2}a^2f^2 - \frac{1}{2}b^2f^2}{b^3}z^2 + \ldots,$$

за исключением первого, исчезают, и этот ряд сводится, таким образом, к fz или, поскольку вместо z подставляется единица, к $f \times 1$.[153] Это показывает нам, что в этом случае свет проходит сквозь то же количество воздуха, как если бы он проходил вдоль поверхности земли расстояние в 3911 туаз или 4197 туаз или расстояние, равное подкасательной f; в этом весьма легко убедиться. Действительно, то, что логарифмическое пространство $DAGR$ равно прямоугольнику с основанием GA, равным единице, и с высотой, равной подкасательной f, означает, что если бы атмосфера имела повсюду ту же плотность, что и у поверхности земли, то она не простиралась бы на столь большое расстояние от земли, а просто имела бы

высоту f в 3911 и в 4197 туаз; таким образом, подобная толща плотного воздуха была бы равноценна действительной высоте атмосферы, которую пронизывает свет небесных светил, находящихся в зените.[154]

Если бы наблюдатель находился на высокой горе, например на вершине Пичинши, то, действительно, высота расположенной выше части атмосферы была бы равноценна, в отношении массы, равномерной толще воздуха в 4197 туаз; однако это было бы справедливо лишь в предположении, что весь этот однородный воздух имеет ту же плотность, что и на Пичинше. Эта плотность, однако, значительно менее плотности у поверхности земли, поскольку плотности пропорциональны высотам ртути в барометре. На уровне этой горы плотность приблизительно на две пятых менее, чем на уровне моря, и на одну треть менее, чем в Квито. В различных населенных местах Кордильер плотность воздуха также снижена. Таким образом, свет звезд должен быть на этих высотах значительно более ярким, а земные предметы должны быть видны с большего расстояния. Именно это мне и удавалось, как я полагаю, неоднократно подмечать.

Следует также заметить, что наш ряд оказывается конечным лишь в единственном случае вертикального направления; во всех остальных случаях его следует продолжать до некоторого члена, дабы он выражал значения масс воздуха с достаточною точностью. Это неудобство свойственно всем рядам; обстоятельство же, понуждающее нас заняться здесь разысканиями другого ряда, заключается в том, что когда синус $AY(b)$ равен нулю, что получается, если светило находится на горизонте, то все члены первого ряда

$$\frac{afz}{b} - \frac{\frac{1}{2}a^2f^2 - \frac{1}{2}b^2f^2}{b^3}z^2 + \ldots$$

становятся бесконечными, и мы не можем, таким образом, извлечь из них никакой пользы.[153]

Дабы разыскать другой ряд, свободный от недостатков предыдущего, я обратил внимание на то, что когда светило находится на горизонте, наша общая формула

$$\int \frac{(1-z)(a+x)\,dx}{\sqrt{b^2+2ax+x^2}}$$

сводится к $\int \frac{(1-z)(a+x)\,dx}{\sqrt{2ax+x^2}}$, ибо $b=0$. Я разыскал затем значения $a+x$, dx и $\frac{1}{\sqrt{2ax+x^2}}$ или $(2ax+x^2)^{-\frac{1}{2}}$, как и ранее, и я подметил, умножая все эти величины на $1-z$, что

$$\frac{(1-z)(a+x)\,dx}{\sqrt{2ax+x^2}}$$

сводится к бесконечному ряду

$$\frac{(af)^{\frac{1}{2}}\,dz}{\sqrt{2}\,z^{\frac{1}{2}}}-\frac{af+3f^2}{4(2af)^{\frac{1}{2}}}z^{\frac{1}{2}}\,dz-\frac{7a^2f^2+18af^3-15f^4}{96(2af)^{\frac{1}{2}}\,af}z^{\frac{3}{2}}\,dz-\ldots,$$

интеграл которого, находимый почленно, равен

$$\frac{2afz^{\frac{1}{2}}}{(2af)^{\frac{1}{2}}}-\frac{af+3f^2}{6(2af)^{\frac{1}{2}}}z^{\frac{3}{2}}-\frac{7a^2f^2+18af^3-15f^4}{240(2af)^{\frac{1}{2}}\,af}z^{\frac{5}{2}}-$$

$$-\frac{5a^3f^3+13a^2f^4-15af^5+7f^6}{448a^2f^2(2af)^{\frac{1}{2}}}z^{\frac{7}{2}}-\ldots$$

С помощью этого нового ряда можно будет теперь найти не только массу воздуха, пронизываемую светом светил, находящихся на горизонте, но также, хотя и с несколько бо́льшим трудом, массы, пронизываемые лучами, приходящими к нам со всех других возвышений. Нижеследующая приближенная

Таблица масс воздуха, содержащихся в атмосфере, и сил, коими обладает свет небесных светил после прохождения сквозь эти массы

Кажущиеся возвышения светил (в градусах)	Массы воздуха, выраженные через равноценные толщи плотного воздуха у поверхности земли (в туазах)	Силы достигающего нас света небесных светил
90	3911	8123
80	3971	8098
70	4162	8016
66°11′	4275	7968
65	4315	7951
60	4516	7866
55	4776	7759
50	5104	7624
45	5530	7454
40	6086	7237
35	6813	6963
30	7784	6613
25	9191	6136
20	11341	5474
19°16′	11744	5358
19	11890	5316
18	12515	5143
17	13220	4954
16	14000	4753
15	14830	4535
14	15880	4301
13	17012	4050
12	18344	3773
11	19908	3472
10	21745	3149
9	23975	2797
8	26672	2423

Продолжение

Кажущиеся возвышения светил (в градусах)	Массы воздуха, выраженные через равноценные толщи мутного воздуха у поверхности земли (в туазах)	Силы достигающего нас света небесных светил
7	29996	2031
6	34300	1616
5	39893	1201
4	47480	802
3	58182	454
2	74429	192
1	100930	47
0	138823	6

10 000 выражает силу, которою обладает свет, входя в атмосферу.

таблица указывает эти массы. Мы сочли возможным избавить себя от труда по пересчету вычислений, основанных на новом значении подкасательной.*

Эта таблица охватывает все направления с бо́льшим или меньшим склонением, начиная от горизонта и вплоть до зенита. Массы воздуха указаны во втором столбце и выражаются, стало быть, через равноценные толщи плотного воздуха у поверхности земли или через толщи, заключающие одинаковые количества частей воздуха. Если, например, против 90° мы находим 3911 туаз, то это означает, что во всей высоте атмосферы заключена, как мы показали, та же масса

* Это значит, что приводимая таблица, почти точно совпадающая с таблицею, помещенной в первоначальном опыте этого сочинения (Essai d'Optique, 1729), не была пересчитана на основе новых сведений, приобретенных впоследствии г-ном Бугером, согласно которым надлежит пользоваться для подкасательной значением 4197 вместо 3911, то есть величины, выведенной из наблюдений г-на де ля Гира, сделанных в Провансе. (*Примечание издателя*).

воздуха, что и в толще в 3911 туаз плотного воздуха у поверхности земли. Подобным же образом мы найдем против нуля градусов возвышения величину 138 823 туаз, ибо свет небесных светил, находящихся на горизонте, должен пройти, прежде чем достигнуть нас, такое же количество воздуха, как если бы он совершал путь в 138 823 туаз в здешнем плотном воздухе. Наша таблица в этом отношении не нуждается в дальнейших пояснениях.[155] Нам остается, однако, сказать кое-что о третьем столбце.

О различных силах, которыми обладает у поверхности земли свет небесных светил, в зависимости от большего или меньшего возвышения их над горизонтом. Мы указали в этом столбце силы света от небесных светил, доходящего до нас, несмотря на недостаток прозрачности атмосферы. Читатель должен вспомнить в этом месте, каким образом мы нашли во втором разделе первой книги (стр. 72), что толща в 7469 туаз нашего плотного воздуха ослабляет свет в отношении 2500 к 1681. Мы пришли к этому заключению, наблюдая свет Луны при двух различных возвышениях. Мы видели (стр. 70), что когда эта планета нисходит с кажущегося возвышения в 66°11′ до 19°16′, ее свет уменьшается в отношении 2500 к 1681. Поскольку мы уже вычислили заранее массы воздуха, пронизываемые лучами, и узнали, что они равноценны путям в 4275 туаз и в 11 744 туаз, проходимым в плотном воздухе, мы заключили, что толща в 7469 туаз уменьшает свет приблизительно на одну треть или в отношении 2500 к 1681, ибо все уменьшение, наблюдаемое при приближении светила к горизонту, проистекает лишь от избытка второго пути над первым.* Исходя из этого предположения, нетрудно вычислить ослабления, причиняемые атмосферою свету небесных светил, находящихся на всех

* Эту фразу, переписанную из „Essai d'Optique", надлежит понимать так: „Поскольку из предыдущей таблицы, вычисленной нами заранее, считая подкасательную равной 3911 туаз, мы нашли, что массы воздуха, пронизываемые лучами, равноценны..." и т. д. (*Примечание издателя*).

остальных возвышениях, ибо, поскольку мы нашли все массы воздуха и свели их к простым толщинам, остается лишь найти уменьшения, вызываемые этими толщинами.

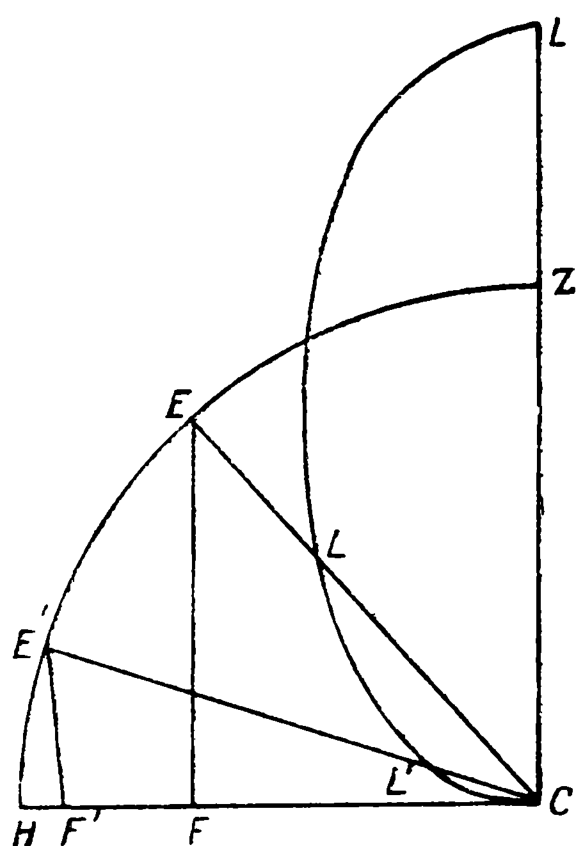
Следовательно, для того чтобы найти, какую часть своей силы теряет свет, доходя до нас, когда светило находится, например, в зените, нам достаточно узнать, насколько он уменьшается на пути в 3911 туаз. Мы составим для этого следующую пропорцию: 7469 туаз относятся к 1723723, то есть к разности логарифмов 2500 и 1681 или к логарифму отношения $\frac{2500}{1681}$, как 3911 туаз к 902594, то есть к разности логарифмов сил света или к логарифму отношения, в коем они уменьшаются. Таким образом, если предположить, что первая сила выражается через 10 000, достаточно будет отнять 902594 от логарифма 10 000, равного 4.0000000, и мы получим логарифм 8123, равный 3.9097406; это показывает, что свет небесных светил, пронизывая атмосферу в вертикальном направлении, уменьшается с 10 000 степеней до 8123, или что он теряет на этом пути немного менее одной пятой части своей силы.

Точно так же, если надобно знать, какое уменьшение оказывает атмосфера, когда небесное светило имеет возвышение в 5°, достаточно произвести расчет для толщи в 39 893 туаз; при этом окажется, что уменьшение происходит в отношении 10 000 к 1201 и что, таким образом, до нас доходит примерно лишь одна восьмая часть лучей, а все остальные бывают задержаны.

Подобным же образом мы нашли все остальные числа третьего столбца, которые не только показывают, насколько свет, получаемый нами, слабее света, входящего в атмосферу, но также говорят, насколько сильнее светят нам звезды, находясь на большом возвышении, сравнительно с тем, когда их возвышение мало. Мы видим, например, что когда светило находится на возвышении приблизительно в $17\frac{1}{3}°$, оно освещает нас в два раза сильнее, нежели тогда, когда

его возвышение составляет лишь 8 градусов и несколько минут; в первом случае до нас доходит половина всего света, тогда как во втором мы получаем лишь его четверть.

В огромном числе случаев может понадобиться общее выражение количеств света, получаемого нами от небесных светил, через кажущуюся высоту последних над горизонтом. Если обозначить на фиг. 44 через s синусы углов ECH, $E'CH$ кажущихся возвышений, полагая полный синус равным единице и обозначая через y количества света LC, $L'C$, получаемые нами от светила, находящегося на большем или меньшем расстоянии от зенита, то формула



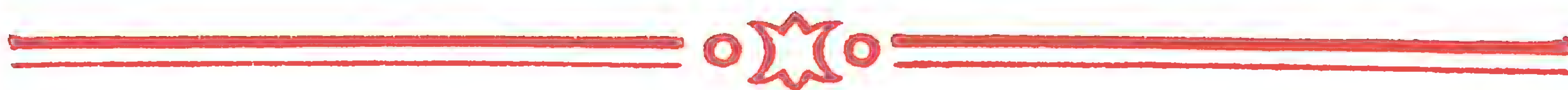
Фиг. 44.

$$y = 219\frac{1}{4}s - 210\frac{3}{4}s^2 + 72\frac{1}{2}s^3$$

выразит с достаточною точностью отношение синусов s и сил света y, в предположении, что интенсивность света, входящего в атмосферу, равна 100.

Добавим также, что по тем же соображениям есть все основания полагать, что мгновенное действие солнца на горизонтальную плоскость пропорционально просто числу его лучей и синусу падения, а не квадрату этого синуса. Это мгновенная солнечная теплота весьма отлична от той, которая получается в результате повторения всех малых действий, и той, которая передается в каждое мгновение соседним телам. Если обозначить ее через u, то мы получим

$$u = 219\frac{1}{4}s^2 - 210\frac{3}{4}s^3 + 72\frac{1}{2}s^4.$$



РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

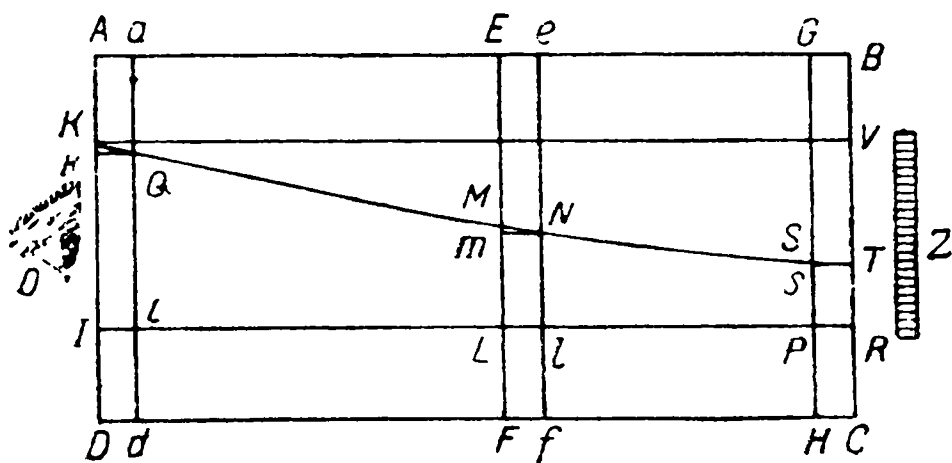
ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВ СВЕТА, ОТРАЖАЕМЫХ ВНУТРЕННИМИ ЧАСТЯМИ ПРОЗРАЧНЫХ ТЕЛ РАЗЛИЧНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЦВЕТОВ ВОЗДУХА, И Т. Д.

Если мы не хотим упустить ничего существенного в рассматриваемом нами предмете, то мы должны исследовать отражение света, проходящего сквозь прозрачное тело, самими молекулами его; этот свет частично отсылается в направлении к нашим глазам. Действие этого отражения часто бывает незначительным, но может оказаться и достаточно большим. Оно происходит лишь с теми лучами, которые задерживаются каждым слоем прозрачного тела, ибо свет, проходящий беспрепятственно, продолжает свой путь далее. Хотя свет, задерживаемый каждым слоем, может считаться бесконечно малым по сравнению с проходящим светом, тем не менее следует принять во внимание, что множество слоев является бесконечным, и это может привести к тому, что отраженный свет будет вполне сравнимым с проходящим. Также не имеет значения и то, производится ли это отражение частицами прозрачного тела или каким-либо флюидом, содержащимся в порах последнего. Для нас это совершенно безразлично, ибо мы, не связывая себя частною гипотезою, будем довольствоваться наблюдением фактов и извлечением из них лишь непосредственно следующих заключений. Мы разберем сначала самые простые случаи, восходя затем к изысканиям более общим и более сложным.

ГЛАВА I

Об отражении, производимом внутренними частями прозрачных тел, когда эти тела равномерно освещены по всей своей толще и одинаково плотны во всех своих частях

Будем наблюдать предмет Z (фиг. 45) сквозь прозрачное тело AC, поместив этот предмет как можно ближе к поверхности BC, а глаз O — вплотную к грани AD, дабы можно было пренебречь действием преломления. Пусть, кроме того, все части светящего тела будут равномерно освещены находящимся сбоку светящим телом и будут одинаково плотными. Все эти условия будут достаточно точно выполнены, если мы будем рассматривать находящийся на горизонте предмет сквозь толщу воздуха в 2 или 3 тысячи туаз



Фиг. 45.

или даже 9 или 10 тысяч туаз, а солнце будет при этом находиться на достаточном возвышении. Воздух будет иметь на всем этом пути достаточно однородную плотность, а также будет освещен с достаточно равномерною силою, вследствие большого возвышения солнца. Обозначим через r и a отношение оси второй детерминатрисы неровностей предмета Z к его диаметру; отнеся квадрат этой оси к единице, мы получим $\frac{r^2}{a^2}$ и можем приписывать предмету тем бо́льшую величину, чем с большего расстояния мы его наблюдаем, считая, что мы рассматриваем всегда часть предмета, стягивающую один и тот же угол. Таким образом, этот квадрат будет находиться всегда в одном и том же отношении с квадратом расстояния до глаза, и мы будем неизменно

иметь для интенсивности света предмета величину $\frac{r^2}{4a^2}$, если только она не претерпит изменения вследствие неполного пропускания света прозрачным телом.

Ординаты KI, ML, TR логарифмической кривой KMT выражают градацию света в среде; эта кривая является градулюцикой среды, предполагаемой совершенно известною, коль скоро нам известны свойства прозрачности нашего тела. Достаточно, стало быть, уменьшить $\frac{r^2}{4a^2}$ в отношении KI к TR, и мы получим для интенсивности света предмета Z выражение $\frac{r^2}{4a^2} \times \frac{TR}{KI}$ или, вернее, $\frac{pr^2}{4a^2} \times \frac{TR}{KI}$, ибо маленькие грани предмета не отражают всех падающих на них лучей; величиною p мы обозначаем отношение, в соответствии с которым они их погашают.[156]

Мы переходим теперь к отражению, производимому каждым слоем среды.[157] Если обозначить через x расстояние каждого слоя до глаза, то часть каждого слоя, которая будет казаться нам покрывающею предмет Z, будет пропорциональна x^2, и если мы уподобим каждую молекулу среды маленькой сфере, то они все будут равноценны одной полусфере с квадратом радиуса, равным x^2, и мы, следовательно, получим из пропорции, которою мы столь часто пользовались во второй книге, величину $\frac{x^2}{4x^2}$ для интенсивности отраженного света, считая, что интенсивность прямого света выражается единицею. Однако поскольку эта последняя интенсивность выражается не единицею или не полным светом KI, падающим на каждый слой, а задержанною частью Kk, которая во столько же раз менее единицы, во сколько Kk менее KI, то интенсивность света должна составлять лишь $\frac{x^2}{4x^2} \times \frac{Kk}{KI}$. Эту величину мы должны подвергнуть двум дальнейшим изменениям. Проходя из L в I, свет должен уменьшаться в отношении KI к ML или становиться вместо Kk равным Mm. Таким образом, с учетом недостатка прозрачности среды, он станет равным $\frac{Mm}{4KI}$. Кроме того, среди

отраженных лучей всегда имеются лучи поглощенные или погашенные; обозначая происходящее вследствие этого уменьшение через q, мы получим для интенсивности света, отражаемого частями среды, расположенными вблизи L и как бы застилающими предмет Z, величину $\frac{1}{4}\frac{Mm}{KI}\times q$. Поскольку то же рассуждение может быть произведено для всех остальных слоев, начиная с I и кончая R, мы получим для интенсивности всего света, отражаемого средою, четверть суммы всех частей Kk, Mm, Ss и т. д., деленную на KI и умноженную на q; этот свет смешивается со светом предмета и составляет $\frac{1}{4} q \times \frac{KI - TR}{KI}$.

Глаз и предмет считаются находящимися в прозрачном теле или весьма близкими к двум ограничивающим последнее поверхностям; если, однако, расстояние от глаза до предмета очень велико по сравнению с толщиной прозрачного тела, то этот случай также оказывается простым. Впрочем, всегда нетрудно учесть изменение интенсивности, происходящее вследствие перемещения мнимых фокусов.

ГЛАВА II

Об интенсивности света предмета и света, отражаемого внутренними частями среды, в случае, когда освещающий их свет проходит сквозь среду

Рассмотрим теперь среду, освещаемую светом, проходящим сквозь различные толщины и ослабляющимся уже на первом своем пути. Предположим также, что предмет освещается проходящим светом, пронизывающим прозрачное тело. Фиг. 46 изображает логарифмическую кривую KMT, относящуюся к этой среде. Единицей обозначен радиус предмета Z, сведенного к круглой поверхности, а r и a выражают, как и ранее, отношение оси второй детерминатрисы неровностей к его диаметру. Положим также, что светящее тело находится на бесконечном расстоянии от прозрачного тела, и примем

интенсивность его света равною единице; она, однако, уменьшается при прохождении света сквозь прозрачное тело в отношении ординаты логарифмической кривой IK к ординате RT. Кроме того, при возвращении от предмета Z к глазу O, почти соприкасающемуся с гранью IK, свет претерпевает дальнейшее уменьшение в подобном же отношении, и интенсивность цвета предмета Z будет поэтому равна $\frac{r^2}{4a^2} \times \frac{RT^2}{IK^2}$. Это количество следует, однако, еще умножить на величину p, указывающую, во сколько раз ослабляется свет при отражении, происходящем на маленьких гранях предмета Z, ибо некоторое число лучей оказывается погашенным. Таким образом, учитывая все обстоятельства, мы получаем для интенсивности света предмета Z, рассматриваемого и освещаемого в одно и то же время через среду KR, выражение $\frac{pr^2}{4a^2} \times \frac{RT^2}{IK^2}$.

Фиг. 46.

Ничуть не труднее оценить силу света, отражаемого внутренними частями среды. Участок каждого слоя, сквозь который мы видим предмет, тем менее, чем ближе этот слой к глазу, и квадрат его радиуса пропорционален x^2, если x означает переменные расстояния IL. Если, в то же время, обозначить ординаты ML логарифмической кривой через y, то интенсивность света, достигающего каждого слоя, будет выражаться не единицею, а величиною $\frac{y}{IK}$; кроме того, следует заметить, что на отражение идет лишь малая задержанная часть Mm, а из этого следует, что интенсивность света, отражаемого в направлении к глазу, равна лишь $\frac{dy}{IK}$. Таким образом, мы располагаем всем, что необходимо для составления нашей обычной пропорции. Совокупность всех молекул, отражающих к нам свет в

каждом слое, равноценна полусфере с квадратом радиуса, равным x^2; квадрат расстояния до глаза равен x^2, а интенсивность света равна $\frac{dy}{IK}$. Мы получили бы для интенсивности отраженного света, достигающего нашего глаза, величину $\frac{dy}{4IK}$, если бы свет не уменьшался на своем втором пути от L до I в отношении, равном отношению KI к $ML = y$. Мы получим, следовательно, для маленького элементарного отраженного света величину $\frac{-ydy}{4\,IK^2}$, а для его интеграла величину $\frac{-y^2}{8\,IK^2}$ или, иначе, $\frac{1}{8}q\left(\frac{IK^2 - RT^2}{IK^2}\right)$, если выразить ее полностью и ввести в нее величину q, указывающую, во сколько раз каждая молекула прозрачного тела ослабляет отражаемый ею свет.

Такова интенсивность света, отражаемого внутренними частями прозрачного тела. Ее выражение станет еще проще, если прозрачное тело будет иметь столь большую толщину, что его можно рассматривать как бы бесконечным и уже нельзя обнаружить никаких следов его дна RV. Тогда квадрат ординаты RT будет равен нулю, и мы получим для интенсивности света, отражаемого всею массою прозрачного тела, просто величину $\frac{1}{8}q$.[158]

ГЛАВА III

Наблюдения над светом, отражаемым внутренними частями хрусталя

Не желая оставить вышеизложенную теорию без всяких приложений, я решил исследовать отражение, производимое внутренними частями куска хрусталя, который, будучи достаточно толстым, ослаблял свет в отношении 9 к 4. Поместив рядом друг с другом две гипсовые дощечки, я рассматривал их сквозь эту среду, хотя и через достаточно удаленные один от другого участки ее, чтобы иметь возможность осветить один из них светом изрядной силы, в то время как другой

находился, напротив, в темноте, которую можно было считать достаточно совершенною. Это различие сказывалось весьма сильно на отчетливости видения. Затемненная часть хрусталя казалась мне заметно более прозрачной, в то время как свет другой половины, отнюдь не прибавляясь к свету предмета, частью затемнял его; вместо прибавления света, которое, как мне казалось, должно было иметь место для дощечки, помещенной на бо́льшем расстоянии, я, напротив, наблюдал уменьшение или как бы вычитание. Я не смею настаивать на том, что совершенно то же самое должно получаться во всех случаях; однако же кусок хрусталя имел легкий беловатый оттенок, весьма располагающий, казалось, к смешению с белизной дощечек; это, однако, не имело места, и я убедился в том, что по мере того, как я яснее видел саму внутренность прозрачного тела, я все хуже различал объект, помещенный за ним. Свет, освещавший одну из половин хрусталя, был приблизительно в 31 раз более сильным, нежели свет, освещавший обе гипсовые дощечки, и, дабы придать обоим последним предметам одинаковую силу, мне пришлось увеличить примерно на одну седьмую часть свет того из них, который рассматривался через освещенную часть прозрачного тела.

Полагая $\frac{r^2}{a^2}$, то есть квадрат оси второй детерминатрисы неровностей, равным $\frac{24\,875}{10\,000}$, что справедливо для гипса, и подставляя в то же время $p=\frac{2}{5}$ и беря числа 9 и 4, дабы выразить ослабления, причиняемые свету при прохождении сквозь среду, мы приведем нашу несложную формулу $\frac{pr^2}{4a^2}\times\frac{TR^2}{KI^2}$, найденную в первой главе для выражения интенсивности предмета, к величине 0.905. Одна седьмая часть этого количества составляет 0.129; это и есть, следовательно, та малая часть, которая равна вторичному свету, отражаемому внутренними частями хрусталя, освещенными светом, в 31 раз более сильным, нежели свет, который сначала падал на ту и другую дощечку.

Этот вторичный свет или свет, отражаемый внутренними частями прозрачного тела, выражается через формулу $\frac{1}{8} q \left(\frac{IK^2 - RT^2}{IK^2}\right)$, когда первичный свет полагается равным единице и наша несложная формула сводится к $q \times 0.951$. Но свет, освещавший половину прозрачного тела, был в 31 раз сильнее того, который освещал дощечки. Поэтому интенсивность света, отражаемого хрусталем, отвечающая увеличению другого света, составляет $q \times 0.951 \times 31$ или, примерно, $30q$, и мы получаем простое уравнение $30q = 0.129$, из которого мы получаем $q = 0.0043$ или $q = \frac{1}{235}$. Мы видим, следовательно, что молекулы хрусталя вместо того, чтобы отражать все задерживаемые ими лучи, возвращают нам лишь $\frac{1}{235}$ часть оных.[159]

Однако мы не можем все же утверждать с определенностью, что бо́льшее число отраженных лучей не встретятся с другими молекулами прозрачного тела и не смогут, отразившись второй раз, вновь направиться к глазу. Впрочем, мы уже убедились в том, насколько слабым является действие этих последовательных отражений, как вследствие особого ослабления, причиняемого каждым из них, так и вследствие большего рассеяния лучей, принимающих различные направления. Удовольствуемся, поэтому, лишь установлением того, что внутренние части хрусталя, а также, по всей вероятности, и внутренние части всех остальных весьма прозрачных тел, отражают лишь очень малую часть света, задерживаемого ими на его пути.

ГЛАВА .V

Предположения о прозрачности морской воды

Нельзя сомневаться в том, что внутренние части воды также отражают изрядный свет, весьма замечательные действия которого могут быть наблюдаемы. Если поверхность этой среды покрыта хотя бы небольшими волнами, то лучи, пронизывающие поверхность, будут претерпевать различные преломления: они

отклонятся от их общего направления и образуют в глазу менее совершенное изображение, что причинит неизбежные помехи нашему зрению. Иногда на поверхность воды выливают некоторое количество масла, которое по ней растекается, и, поскольку частицы масла обладают большею вязкостью, нежели частицы воды, и сильнее сцеплены друг с другом, они менее способны приобретать волнообразное или прерывистое движение под действием ветра. Частички масла образуют более ровную поверхность и, находясь в известном покое, сообщаемом ими самой воде, благоприятствуют возможности наблюдения дна.

Другой способ, степень достоинства которого может быть испытана, заключается в том, что для наблюдения воды пользуются трубкой, погружаемой своим нижним концом в воду и закрытой прозрачным стеклом. Это средство позволяет устранить какое бы то ни было влияние волнения поверхности воды и избежать действия всех беспорядочных преломлений; однако, несмотря на все это, наш взор не может проникнуть на большую глубину, и этому, совершенно очевидно, мешают лучи, отражаемые внутренними частями среды; свет, посылаемый ими вверх, превосходит свет, посылаемый самим дном, хотя последнее бывает нередко покрыто песком или белыми камешками.[160]

Когда солнце стоит очень высоко и когда мы находимся в открытом море, эти лучи, отражаемые частицами самой среды, являют, порой, весьма замечательную картину. Находясь на одной из палуб корабля, можно видеть бесчисленное множество лучей, идущих от изображения сольца, когда оно находится под корпусом корабля и недоступно глазу. Эту картину образует бесчисленное множество частиц воды, и, поскольку они все расположены в точности одинаковым образом по отношению к точке, служащей центром или светящим телом, и освещены под одинаковым углом падения, они образуют светящие следы, своей непрерывностью совершенно сходные с лучами. Нельзя сомневаться в том, что этот вторичный свет обычно создает величайшие затруднения при наблюдении дна, когда находишься наверху, и я убежден, что наилучший способ изба-

виться от них состоит в том, чтобы затенить большой участок среды, прикрыв последнюю какой-нибудь непрозрачною поверхностью, например клеенкою. У одного из краев этой поверхности надлежит проделать отверстие, введя в последнее зрительную трубу, упоминавшуюся ранее, которую следует установить наклонно; поскольку она будет расположена по диагонали, весь путь зрительных лучей будет лежать в тени, а наблюдаемый участок дна будет полностью освещен.

Я уже имел, однако, случай указать, что все эти предосторожности не являются совершенно необходимыми, дабы видеть дно моря на глубине до 20—25 саженей или около 100—125 футов. Для этого достаточно благоприятного стечения ряда обстоятельств: высокого стояния солнца, спокойного моря и очень белого морского дна. Формула $\frac{pr^2}{4a^2} \times \frac{RT^2}{IK^2}$ (фиг. 46) дает нам при этом интенсивность света дна и содержит в качестве неизвестного лишь отношение двух крайних ординат IK и RT логарифмической кривой, служащей градулюцикою морской воды, коль скоро дозволено воспользоваться значением величины p, найденным нами для гипса, что представляется довольно правдоподобным. Мы получим, следовательно, для интенсивности дна $\frac{2}{5} \times \frac{24\,875}{40\,000} \frac{RT^2}{IK^2}$ или $\frac{2487}{10000} \times \frac{RT^2}{IK^2}$; и, если предположить, что молекулы морской воды отражают, подобно молекулам хрусталя, лишь одну 235-ю часть получаемого ими света, хотя можно думать, что они отражают его еще менее, то наша несложная формула $\frac{q}{8}\left(\frac{IK^2-RT^2}{IK^2}\right)$, выражающая отражение, производимое внутренними частями воды, сведется к $\frac{1}{1880}\left(\frac{IK^2-RT^2}{IK^2}\right)$.

Поскольку морское дно наблюдается в присутствии этого второго света, необходимо, чтобы свет, идущий со дна, составлял по крайней мере одну 60-ую часть второго света. Другими словами, необходимо, чтобы

$$\frac{1}{1880}\left(\frac{IK^2-RT^2}{IK^2}\right)=60 \times \frac{2487}{10000} \times \frac{RT^2}{IK^2},$$

откуда следует, что отношение $\frac{RT}{IK}$ последней ординаты RT логарифмической кривой к ее первой ординате IK составляло одну 167-ю для пути в 100 или 120 футов в морской воде; толщина в 10 футов должна ослаблять свет, соответственно, в отношении 100 к 71. Следует заметить, что мы получили бы почти то же самое, если бы полагали, что отражение, производимое внутренними частями воды, и отражение от внутренних частей хрусталя достаточно сильно отличаются друг от друга.[161]

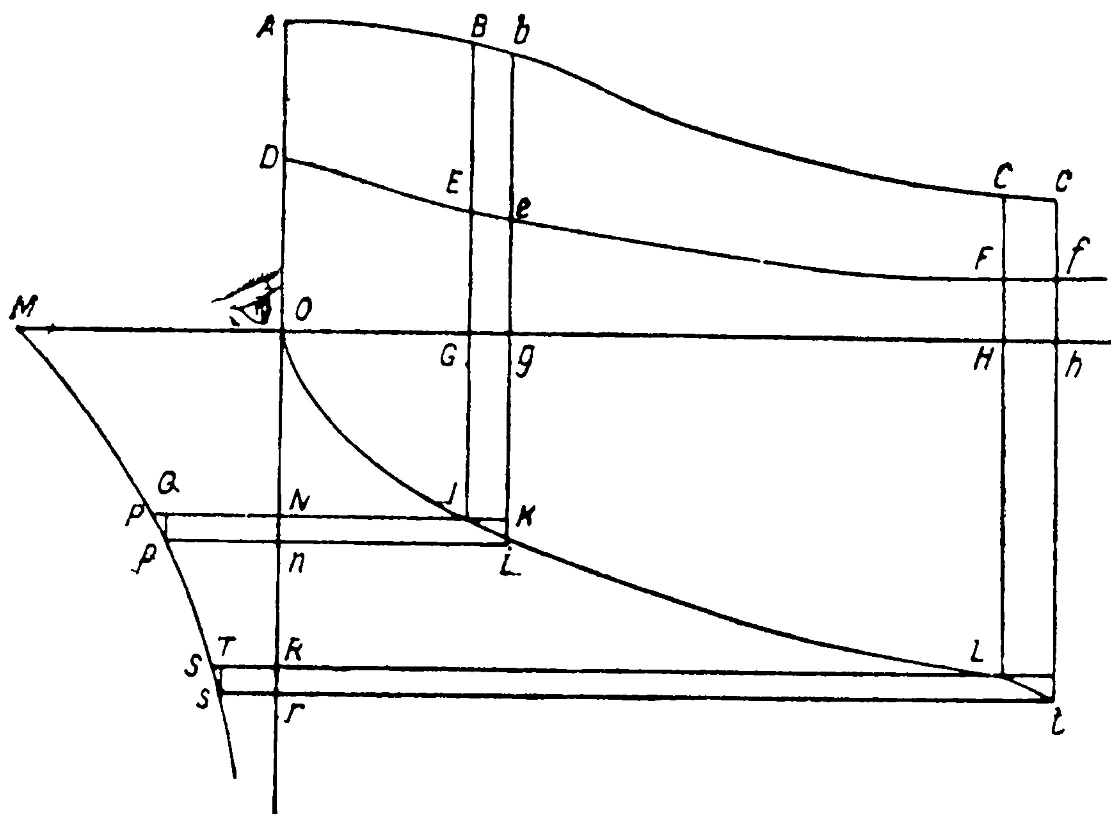
ГЛАВА V

О свете, отражаемом внутренними частями среды, если последняя не обладает повсюду одинаковою плотностью и если она освещается светом различных степеней

Мы несколько усложним наши изыскания, предположив, что прозрачное тело не обладает повсюду одинаковою плотностью и что свет, освещающий его, также неодинаков. Больше того, мы углубимся в сугубые подробности, чтобы подытожить или разъяснить бо́льшую часть уже сказанного нами.

Линия OH (фиг. 47) изображает зрительный луч, которому, как мы будем полагать, сопутствуют различные кривые, чьи ординаты выражают различные свойства, рассматриваемые ниже. Ординаты GB, HC первой кривой отмечают интенсивность света, освещающего точки G и H. Плотности среды в этих же точках выражаются ординатами GE, HF кривой DEF. Таким образом, количества вещества, находящегося на зрительном луче, выражаются площадями $OGED$ или $OHFD$. Эти количества вещества отмечаются ординатами GI и HL третьей кривой OIL; другими словами, ординаты последней кривой пропорциональны площадям предыдущей, отвечающим тем же абсциссам и начинающимся в O. Наконец, MPS есть логарифмическая кривая, абсциссы которой ON, OR равны и параллельны ординатам прдыдущей кривой; эта кривая служит градулюцикою, если свет пронизывает массы повсюду

одинаково плотной среды, толщины которой ON, OR и т. д. равны GI, HL и т. д.



Фиг. 47.

Введем следующие обозначения:

Переменная длина OG зрительного луча или абсцисса наших кривых x
Интенсивность BG света, освещающего каждую точку G на зрительном луче . . . . s
Плотность GE среды . . . . u
Ординаты GI кривой OIL, пропорциональные площадям DG предыдущей кривой . . . . z
Первая ордината MO логарифмической кривой MPS . . . . e
Последняя ордината SR этой кривой . . . . f
Ее переменные ординаты NP . . . . y
Ее подкасательная . . . . h
Наконец, число раз, в которое свет уменьшается при отражении от каждой молекулы среды . . . . q

Предположив все это, мы видим, что с помощью нашей третьей кривой OL мы избавили себя от необходимости постоянно считаться с различиями в плотности среды, поскольку

мы свели их к равноценным толщинам одинаковой плотности. Проходя *GI* или *HL*, свет должен претерпевать такое же ослабление, как если бы он проходил *OG* или *OH*, ибо массы среды, лежащие на видимом луче от *G* или *H* до *O*, составляют $\int udx$ и выражаются через $1 \times GI$, $1 \times HL$ или вообще $1 \times z$. Читателю ясно также, что для того, чтобы найти интенсивность света, способного отразиться по направлению к глазу, достаточно составить пропорцию

$$y : s : : dy : \frac{sdy}{y},$$

ибо, как мы неоднократно имели случай заметить, отражение по направлению к глазу претерпевает не тот свет, который пронизывает среду, а тот, путь которому преграждается; эта часть составляет лишь dy или PQ по сравнению с $PN = y$.

Наконец, когда мы бросаем взгляд в направлении *OH*, он охватывает не только те молекулы, которые лежат на этой линии; в наш кругозор попадает некоторое пространство, пропорциональное квадрату x^2 расстояний *OG*, *OH*, и, если продолжать сравнивать каждую маленькую молекулу среды с маленькою полусферою, то мы можем рассматривать поверхность x^2 как основание большой полусферы, которая заменяет все маленькие. Наша обычная пропорция принимает, следовательно, вид:

$$x^2 : \frac{1}{4} x^2 : : \frac{sdy}{y} : \frac{sdy}{4y},$$

и мы получили бы, таким образом, величину $\frac{sdy}{4y}$ для интенсивности света, отражаемого каждым слоем, если бы он не ослаблялся в q раз вследствие недостатка отражения, приводящего к поглощению или погашению многих лучей, и если бы свет не уменьшался, кроме того, в отношении *MO* к *PN* или e к y на своем пути от точки *G* до точки *O*, — пути, равноценном *ON* в среде с равномерною плотностью. Таким образом, мы получим для интенсивности света, посылаемого по направ-

лению к глазу каждым слоем среды, величину $\frac{qsdy}{4e}$, а для полного количества этого света интеграл $\int \frac{qsdy}{4e}$.

Мы можем преобразовать это общее выражение в другое, в ряде случаев не менее полезное. Поскольку ординаты $GI = z$ пропорциональны площадям $DG = \int udz$, мы имеем $udx = dz = Kl$, и логарифмическая кривая MPS, подкасательная которой есть h, дает нам

$$dy = \frac{ydz}{h} = \frac{yu\,dx}{h}.$$

Подставляя последнее значение dy в общее выражение количеств света, отражаемого средою, мы получим для полного отраженного света выражение $\int \frac{\frac{1}{4}\,qsyudx}{eh}$, совершенно тождественное первому выражению $\int \frac{qsdy}{4e}$. [162]

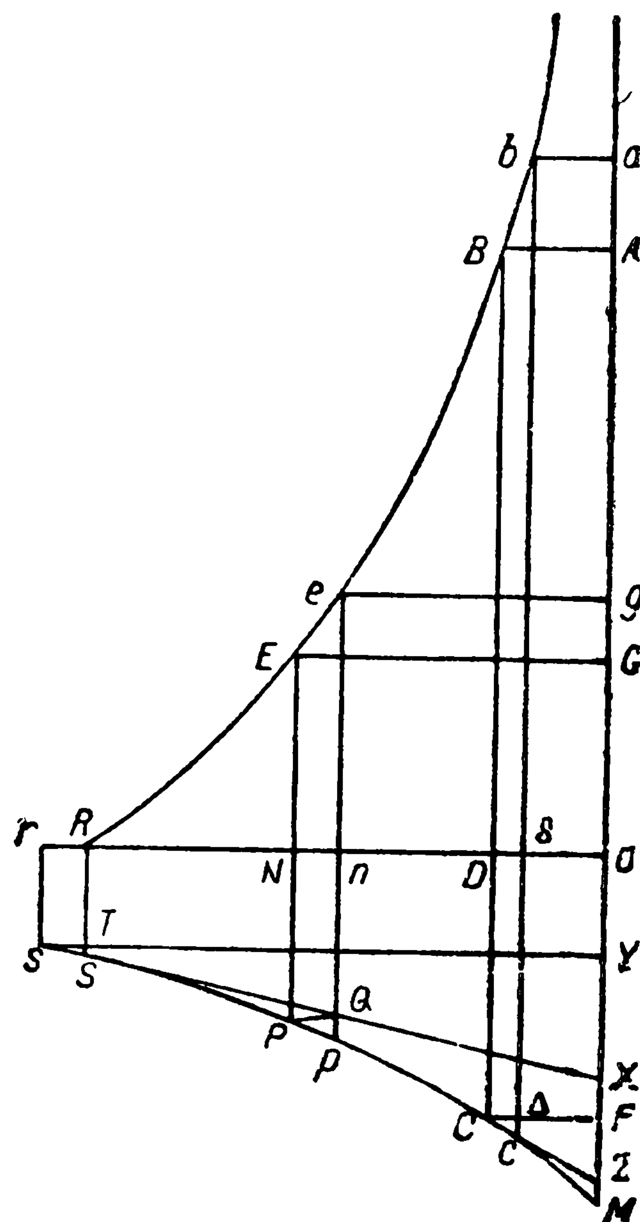
ГЛАВА VI

Различные приложения формул предыдущей главы к цвету воздуха

Сколь бы ни были просты приведенные нами общие формулы, приложение их иногда отнимает много времени и труда, ибо требует длительных вычислений. Поэтому иногда предпочтительнее удовольствоваться выявлением смысла этих формул в различных частных случаях.

Предположим, например, что мы рассматриваем высь атмосферы, когда солнце находится весьма близко к зениту; это будет один из частных случаев нашей задачи, когда можно просто проследить сущность метода. Среда имеет переменную плотность, и интенсивность света, освещающего ее, также переменна. Массы воздуха, пронизываемого светом, нисходящим до каждого из слоев, будут выражаться ординатами AB,

GE логарифмической кривой BER (фиг. 48), подкасательная которой равна 3911 туазам или, точнее, 4197 туазам, по крайней мере в верхних слоях атмосферы, что приводит к различию между массами воздуха, которые будут приведены далее, и теми, коими я пользовался в предыдущем разделе. Ординаты другой логарифмической кривой MPS выражают количества света. Первая ордината OM выражает количество света, входящего в атмосферу, DC — количество света, достигающего точки A после прохождения массы воздуха, равноценной AB; ордината NP есть интенсивность света, достигающего G после прохождения массы воздуха, равноценной EG. Наконец, RS есть сила света, достигающего поверхности земли после прохождения в вертикальном направлении всей толщи атмосферы, равноценной, стало быть, OR.



Фиг. 48.

Когда свет достигает слоя EG и сила его уменьшается до величины NP, то в нашем направлении должна отражаться, как мы уже много раз указывали, лишь малая часть Qp света, падающего на молекулы воздуха весьма наклонно. Проходя толщу GO, он должен пронизать массу воздуха $OR - GE = NR$ и уменьшиться в отношении NP к RS или свестись от Qp к TS. Поскольку то же самое происходит со всеми остальными частями света, отражаемыми в нашем направлении и оказывающимися равными TS, то, следовательно, мы имеем столько же величин TS, кои надлежит просуммировать, сколько частей Nn содержится в RO. Таким образом, нам остается лишь провести касательную SX к ло-

гарифмической кривой SM в точке S, проведя одновременно TY параллельно RO, откуда мы получим для бесконечной суммы величин TS величину XY, а для цвета воздуха — величину $\frac{1}{4} XY \times q$, соразмерно величине OM, означающей силу света, входящего в атмосферу, и величине RS, выражающей силу, коей обладает свет у поверхности земли, несмотря на недостаток прозрачности воздуха.

Если наблюдатель находится не в точке O, а в точке A на вершине какой-либо весьма высокой горы, то нам остается лишь, совершенно сходным образом, провести касательную CZ к логарифмической кривой MCS в точке C, отвечающей точке B, и провести в то же время CF параллельно RO, откуда мы получим для цвета воздуха всей верхней части атмосферы, находящейся выше точки A, величину $\frac{1}{4} FZ \times q$, ибо каждая часть света, отражаемая сверху к расположенному ниже наблюдателю A, сведется к с Δ.

Допустим обратное: наблюдатель, находящийся на вершине горы A, смотрит вниз, и все расположенные ниже предметы представляются ему несколько затемненными; солнечный свет достигает до них, ослабляясь почти на одну пятую часть, как показывает таблица, помещенная в конце предыдущего раздела. Если даже не учитывать ослабления, претерпеваемого светом вследствие отражения от земных тел, он ослабляется далее в отношении DC к RS на своем восходящем пути от O до A, ибо таково отношение, в котором ослабляется свет, проходящий массу воздуха, равноценную DR.

Что касается до цвета воздуха, то его очень легко определить. Солнечный свет, достигая G, выражается уже не через OM, как ранее, а через NP; часть, отсылаемая вследствие отражения вверх к наблюдателю A, равна Qp. Эта часть Qp на своем пути GA пронизывает массу воздуха ND, то есть избыток EG над BA, и должна уменьшаться в отношении DC к NP; иначе говоря, обозначая ординату NP через y, мы получим для света, исходящего из области

вблизи G и достигающего наблюдателя A, величину $-\frac{ydy}{DC}$ или, вернее, $\frac{qydy}{4DC}$, интегрируя которую, мы получим для интенсивности отраженного света или для цвета воздуха величину $-\frac{qy^2}{8DC}$ или, беря полный интеграл, $\frac{q}{8}\left(\frac{DC^2-RS^2}{DC}\right)$. Мы видим, что она заключена в достаточно узкие пределы, поскольку DC никогда не превосходит RS более, чем, примерно, на одну пятую. Однако следует иметь в виду, что q имеет одно и то же значение лишь когда мы рассматриваем верхнюю часть атмосферы, поскольку q зависит от угла падения лучей света на молекулы воздуха. В настоящем случае углом падения, дающим сильное отражение, является прямой угол, тогда как в случае, когда мы смотрим снизу вверх, угол падения приближается к нулю, что обуславливает отражение еще значительно более сильное.[163]

ГЛАВА VII

О цветах воздуха вблизи зенита, когда солнце находится на горизонте, и цветах воздуха вблизи горизонта, когда солнце находится в зените. Два различных способа видения весьма удаленных земных предметов

Я приложил формулы главы V к двум различным случаям, в которых угол падения лучей света на молекулы воздуха составляет 45° и в которых, следовательно, ослабление, причиняемое отражением, происходит в точно одинаковом отношении q. Предположив сначала, что солнце находится на горизонте, я разыскал с помощью рядов предыдущего раздела массы воздуха, которые должны пронизываться лучами света, освещающими частицы атмосферы, расположенные на вертикали AD (фиг. 42 и 43). Зная эти массы, я определил интенсивности света в различных точках D, F, A и т. д., обозначенные в наших формулах буквою s. Что же касается плотностей среды u, то они даются непосредственно

ординатами логарифмической кривой GOR, а эти ординаты пропорциональны площадям $REFD$; их дополнения до GA пропорциональны, следовательно, другим площадям $EGAF$, обозначенным в наших формулах буквою z. Наконец, логарифмическая кривая, служащая градулюцикою воздуха, дает нам значение y; подкасательная h этой кривой равна, как известно, 18 818 туазам. Закончив подсчет, я получил значение $\frac{784}{10000}$ для величины $\int \frac{\frac{1}{4} qsyudx}{eh}$ или для цвета воздуха на участке неба около зенита, если сила солнечного света, достигающего земной поверхности, выражается единицею.

Я вычислил приблизительно таким же способом горизонтальные цвета воздуха, полагая солнце находящимся вблизи зенита, и получил значение $\frac{2575}{10000} q$, считая, что буква q выражает в точности то же отношение, что и в предыдущем вычислении, а угол падения также равен предыдущему, поскольку угол, образованный падающими и зрительными лучами, в этом случае также является прямым.[161] Я не удовольствовался в этом втором изыскании определением цвета воздуха для всей толщи атмосферы, а вычислил его для различных толщин, составив нижеследующую таблицу, в которой расстояния выражаются в больших лье, коих 20 в одном градусе.

Достаточно бросить взгляд на числа этой таблички, чтобы понять сущность двух весьма различных причин, по которым мы перестаем видеть самые крупные земные предметы, когда они чрезвычайно удалены. Если очень большая гора покрыта лесом и находится на расстоянии 29 или 30 лье, она посылает наблюдателю лишь очень мало света, ибо, помимо того, что лесная зелень отражает свет незначительной яркости, листья деревьев разделены тенями, не возвращающими ни одного луча. Однако если атмосфера чиста и прозрачна, то гора будет залита всем светом, отражаемым массою воздуха, заключенною между предметом и глазом наблюдателя;

этот цвет выражается через $\frac{2525}{10000}q$, в то время как цвет всей атмосферы или цвет неба, видимого сбоку, составляет

Расстояние в лье	Массы воздуха, выраженные в туазах воздуха однородной плотности	Интенсивность цвета воздуха
$2\frac{1}{2}$	7115	$\frac{778}{10000}q$
5	14231	$\frac{1289}{10000}q$
10	28257	$\frac{1967}{10000}q$
15	41931	$\frac{2268}{10000}q$
20	55096	$\frac{2410}{10000}q$
30	79307	$\frac{2525}{10000}q$
45	109099	$\frac{2565}{10000}q$
60	130548	$\frac{2572}{10000}q$
90	153128	$\frac{2575}{10000}q$
180	169518	$\frac{2575}{10000}q$

$\frac{2575}{10000}q$. Хотя разница и составляет лишь одну 51-ю часть, она обычно оказывается достаточно большою, чтобы быть замеченною при некотором внимании. Если бы гора находилась еще ближе, то неравенство оттенков этих двух различных цветов воздуха было бы бóльшим; предмет, неизменно сохраняя свою форму, напоминал бы собой тучу несколько боль-

шей плотности; его цвет был бы несколько более темным по сравнению с небом. Напротив, находясь, в рассматриваемом случае, на грани исчезновения, он примет подобие легчайшего и прозрачнейшего облака, или, другими словами, мы увидим на месте горы небесную лазурь, словно покрытую легкою дымкою.

Если бы гора была удалена лишь на 18 000 или 20 000 туаз, то мы, быть может, различали бы некоторые следы ее зеленого цвета; ее свет был бы при этом ослаблен в отношении 1000 к 346 вследствие недостатка прозрачности воздуха, который, как мы знаем, вызывает совокупно с цветом воздуха уменьшение силы или яркости непосредственно рассматриваемых предметов. Одновременно с тем, что гора посылала бы большее число лучей, цвет воздуха имел бы меньшую интенсивность и оба цвета изменялись бы в противоположные стороны.

Весьма важная задача, которая, однако, может быть разрешена только опытом, состоит в том, чтобы узнать, может ли это смешение цветов, производимое природой, быть достаточно точно передано надлежащим смешением вещественных красок, употребляемых нашими художниками. Недостаток прозрачности воздуха устанавливал бы долю зелени, которую необходимо ввести в смесь, а другая часть смеси определялась бы цветом воздуха. Я не берусь утверждать что-либо по этому поводу, однако я убежден в том, что стоит отважиться на некоторые предположения, если только считать, что они могут принести пользу, будучи высказаны с необходимою осмотрительностью.

Эти предметы, находящиеся на грани исчезновения в дали, видимы, так сказать, лишь *негативным* образом; другие, однако, хотя бы они и находились на бо́льшем удалении, видимы *позитивно*, если свет, посылаемый нам от них, сильнее света, приходящего к нам от окружающих их частей неба. Если весьма темная гора находится на расстоянии в 45 или 50 льё, то цвет воздушной лазури, скрывающий ее, будет выражаться через

величины $\frac{2565}{10000}q$ или $\frac{2567}{10000}q$, отличающиеся столь мало от величины $\frac{2575}{10000}q$, выражающей цвет воздуха на небе, что разница будет совершенно неощутимою. Если, однако, гора будет покрыта очень белым песком или снегом, она сможет стать хорошо видною. Некоторые наблюдатели утверждали, что земные предметы чрезвычайно большого объема могут быть видны с еще большего расстояния; я знаю, однако, что, рассуждая об этих предметах, обыкновенно предполагают бесчисленное множество вещей, не всегда твердо установленных опытом. Я ограничиваюсь расстоянием в 45 льё: с этого расстояния видна из залива Гваякиль гора Чимборазо, одна из самых высоких в Перу, а, быть может, и во всем мире, обладающая всем необходимым, чтобы быть видною с очень большого расстояния. Ее вершина имеет громадный объем, и никакое препятствие не может скрыть ее от удаленного наблюдателя, ибо когда я расположился у нижнего края вечных снегов, которыми она покрыта, иначе говоря, на 800 туаз ниже вершины, я видел солнце заходящим приблизительно на два градуса ниже видимого горизонта.*

Снег поглощает, повидимому, не более трети или четверти падающих на него лучей. Его пронизывают, главным образом, зеленые лучи; однако если мы предположим, что он ослабляет свет лишь в отношении 4 к 3 и что, кроме того, квадрат оси второй детерминатрисы неровностей равен $\frac{r^2}{a^2}=\frac{24875}{10000}$, как и для многих других поверхностей, а также примем во внимание, что путь в 45 льё ослабляет свет примерно в 327 раз, то мы

---

* Эта гора имеет по вертикали высоту в 3217 туаз над уровнем моря. Находясь на одной из ее вершин, я нашел, что мой отвес отклонялся в сторону горы на $7''\frac{1}{2}$, как я отметил в своей книге о фигуре Земли; это отклонение, судя по всем другим наблюдениям, произведенным с достаточною тщательностью, оказывается еще гораздо бо́льшим. См. главу 57 Мемуаров Треву за 1751 г., первый том за май месяц.[165]

получим значение $\frac{1}{701}$ для интенсивности света, посылаемого нам горою, часть которого затушевывается светом воздуха силою в $\frac{2565}{10000}q$, с которым он смешивается. Каково бы ни было в действительности это уменьшение, разница $\frac{1}{701} - \frac{2565}{10000}q$ все еще сильнее цвета воздуха неба $\frac{2575}{10000}q$, поскольку белый цвет снега различается совершенно ясно. Таким образом, необходимо, чтобы $\frac{1}{701} - \frac{2565}{10000}q$ превосходило $\frac{2575}{10000}q$ по крайней мере на одну 60-ю часть, что дает нам для величины q или для одного из ее пределов значение $\frac{1}{363}$, а это показывает, что молекулы воздуха отражают нам не более одной 363-й части задерживаемых ими лучей; можно даже с полным основанием полагать, что они отражают и того менее, вследствие чего предмет будет виден с бо́льшею четкостью, коль скоро он виден, как в нашем случае, положительным образом, благодаря собственному свету.[166]

ГЛАВА VIII

Замечания о различных способах определять часть света, отраженную частицами воздуха

Хотя мы вполне уверены, что предыдущий способ определения не лишен известных оснований и что его можно принять по крайней мере в виде объяснения, мы признаемся чистосердечно, что он отнюдь не является прямым и что в него могут вкрасться различные ошибки, которые в совокупности могут оказаться значительными. Физики, которые сочтут этот предмет достойным исследования, смогут, дабы лучше определить интенсивность цветов воздуха, сравнить их непосредственно со светом луны или, если угодно, уловить их на дощечки одновременно с падающим рядом светом солнца и искать отношение этих светов, как мы это пытались делать. Было бы уместно воспользоваться при этом в качестве членов сравнения призматическими цветами или, по крайней мере, упо-

требить дощечки, выкрашенные в разные цвета, что мы уже советовали делать в другом месте. Эти обстоятельства являются существенными, даже если ограничиться исследованием какого-либо частного случая. Пусть речь идет лишь о цветах воздуха по горизонту. Прежде всего надлежит считать солнце находящимся в зените; затем следует вычислить интенсивность этого цвета, полагая солнце стоящим все ниже и ниже, на одной и той же вертикали, и неизменно удаленным на 90° от зрительного луча. Угол падения будет всегда равным 45°, и все разности, найденные вычислением и проверенные затем на опыте, будут проистекать лишь от недостатка прозрачности атмосферы и от происходящего в действительности разделения света, поскольку красные лучи будут проникать значительно далее, а голубые лучи, обладая, напротив, меньшею силою для прохождения в прямом направлении, будут отражаться значительно легче.

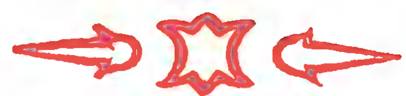
Наконец, можно заставить изменяться угол падения или в два раза больший угол, образованный падающими лучами солнца и зрительными лучами, и сочетать наблюдения с расчетами, чтобы сделать все возможные выводы. При перпендикулярном падении отражение, производимое частицами воздуха, должно быть весьма сильным, ибо, несмотря на большой путь, который должен пройти солнечный свет, чтобы достичь противоположных частей атмосферы, цвет воздуха имеет весьма значительную интенсивность. Когда солнце близко к горизонту, лучи его должны пройти массу воздуха в 130 или 140 тысяч туаз, перед тем как достигнуть точки *A* (фиг. 43), и, кроме того, они должны пройти *AM* или *AS*, чтобы дойти до точек *M* и *S*, и т. д. Однако мы получаем весьма яркий цвет воздуха от всех зрительных горизонтальных лучей *AS*. Стало быть, часть *q* света, отраженного при перпендикулярном падении, весьма велика и восполняет недостаток прямого света, причем иногда даже с избытком. Когда же падающие лучи солнца образуют прямой угол со зрительным лучом *AS* и когда углы падения, составляющие лишь половину этого,

угла, равны лишь 45°, падающие лучи, напротив, должны пройти весьма короткий путь, дабы достигнуть точек M и S; лишь вблизи точки A, где их путь наиболее длинен, они должны пройти радиус видимого горизонта, тогда как в других точках они должны проходить лишь синусы. Однако то, что цвет воздуха оказывается значительно более слабым, доказывает, что величина q в этом частном случае крайне мала. Кроме того, для того, чтобы оценить ее, достаточно сравнить наблюдение с результатом, найденным путем вычисления, проделав это же самое для всех других углов падения, причем, как мы уже говорили, величина q будет возрастать по мере того, как эти углы будут становиться меньше 45°, ибо отражение никогда не бывает более ярким, нежели при углах падения, как бы бесконечно малых. Этот более сильный отраженный свет образован, главным образом, голубыми лучами и, быть может, увеличен за счет лучей, претерпевающих некое небольшое преломление.

Это дает объяснение весьма своеобразному явлению, непрестанно привлекающему внимание художников и явившемуся предметом мемуара г-на Бюффона. Однако, насколько мне известно, никто не указал физической причины этого явления. Утром и вечером тени приобретают голубой оттенок, причем почти такое же действие производит и свеча, если она заменяет солнце в мгновение, предшествующее его восходу. Это явление вызывается цветом атмосферного воздуха, освещающего эти тени, в котором преобладают голубые лучи; последние отражаются наклонно в большом количестве, в то время как красные лучи, которые теряются на далеком расстоянии, следуя вдоль прямой линии, не могут изменить тени, поскольку они не отражаются или отражаются значительно слабее.

Все эти вопросы, несмотря на все наши попытки дать им объяснение, оставляют, конечно, весьма широкое поле изысканий для любознательных лиц. Мы признаемся в этом чистосердечно и с удовольствием предоставляем другим преимущество завершить то, что мы смогли лишь едва начать.

ПРИЛОЖЕНИЯ





ПРЕДИСЛОВИЕ К КНИГЕ „ОПЫТ О ГРАДАЦИИ СВЕТА“ (1729 г.)

Большинство лиц, хотя бы немного искушенных в оптике, знает, что эта область математических наук разрабатывается с давних пор. Евклид и Птоломей и, много веков спустя, Альхазен и Вителлий работали в области собственно оптики, а также катоптрики, иначе говоря, они изучали свойство света распространяться по прямой линии и отражаться от зеркал и других полированных тел. Ученые нового времени исследовали затем преломление, или искривление, претерпеваемое светом, когда он проходит наклонно сквозь среды с различной плотностью. Первым, открывшим закон этих преломлений, был Снеллий, а г-н Декарт, изучив этот закон более подробно, чрезвычайно далеко продвинул приложения его. Он объяснил значение влаги глаза и всех его частей для зрения; определив затем форму, которую должны иметь стекла зрительных труб, он рассеял драгоценные семена изобретений, коими усовершенствованы микроскопы и все подобные приборы, столь успешно используемые диоптрикою, чтобы восполнить недостаточность наших глаз и удовлетворить даже свыше наших ожиданий нашу любознательность. Наконец, г-н Ньютон, этот великий математик, об утрате которого все еще сожалеют Англия и вся ученая Европа, исследовал свет с совершенно иной стороны. Он показал, каков его состав, каким образом свет получается из смеси основных цветов и каким образом каждый цвет претерпевает различное, свойственное ему одному, преломление.

Может показаться, что после всех этих пространных теорий, которые еще совершенствовались и более широко публиковались бесчисленным множеством авторов, в этой области не осталось ничего неоткрытого. Однако нетрудно заметить, что, поскольку до сих пор почти всегда ограничивались лишь изучением расположения и направления лучей, оптике недостает целого отдела, в котором речь шла бы о силе или яркости света. Это было признано довольно давно: действительно, чтобы не ходить далеко, достаточно указать, что г-н Озу жаловался в одном из своих писем более шестидесяти лет тому назад, что мы не умеем определить, на сколько ступеней один свет превосходит другой, хотя бы доподлинно было известно, что он сильнее другого. Г-н Гюйгенс, правда, изложил впоследствии в своем „Космотеоросе" способ сравнивать свет звезд со светом Солнца, однако, уже не говоря о том, что способ, предложенный им, несовершенен, очевидно, что для того, чтобы добавить к оптике новую часть, недостаточно дать правильный способ делать опыты по измерению силы света; надлежит также дать средства извлекать из этих опытов все необходимые заключения и сравнивать с помощью вычисления различные ступени силы или яркости лучей. Действительно, опыты, сделанные наблюдателем, лишенным теории, не подвигают его по существу ни на шаг. Предположим, что он нашел, какую потерю причиняет свету некоторая толща прозрачного тела; он отнюдь не узнает отсюда, какова будет потеря, причиняемая всеми другими толщами, и ему придется повторять свои опыты до бесконечности, прежде чем он удовлетворит свою любознательность по поводу прозрачности и непрозрачности одного единственного тела.

Чтобы преодолеть это затруднение, в этом маленьком сочинении после содержащегося в первом разделе объяснения способа приобретать фактические сведения путем действительного измерения силы света делается попытка показать, какое может быть сделано из этого употребление, дабы получать все остальные сведения, в которых может явиться надобность.

Вначале мы предполагали лишь определить, насколько свет Солнца сильнее, когда это светило находится на большом возвышении над горизонтом, чем тогда, когда это возвышение мало. Нас побудила к этому одна статья, напечатанная в 1721 г. в Мемуарах Академии Наук, в которой г-н де Меран предполагает известным отношение светов Солнца при двух полуденных высотах летнего и зимнего солнцестояний. Прочтя этот мемуар с тем вниманием, коего не могут не заслуживать все сочинения этого знаменитого академика, я не смог более сдержать желание найти некоторые средства, чтобы произвести указанные им измерения. Г-н де Меран лишь предполагает, что таковые сделаны, ибо его произведение, собственно говоря, не касается измерений; он отмечает, однако, цитируя г-на Гюйгенса, что если они и чрезвычайно трудны, то нет все же никаких оснований отчаиваться в их успехе. Это и заставило меня произвести попытку измерить силу света от Луны при двух различных возвышениях; соблазненный затем легкостью метода, на котором я остановился, я дал ему другие приложения, с подробностями коих читатели могут познакомиться в анналах 1726 г. Сколь слабыми ни были эти начинания, я не мог не представить их на суд Академии: простота способа обещала сделать его важным, и я должен прибавить, что ничто не побудило меня продолжить этот труд в той мере, как любезность, с которой Академия, всегда готовая ободрить всех обращающихся к ней, соблаговолила принять первые его плоды. Оставалось еще исследовать уменьшение, претерпеваемое светом, когда он разделяется на несколько цветов; я даже предвижу, как мне кажется, что, разрабатывая этот предмет далее, можно было бы подчинить точным правилам геометрии ту часть живописи, которая еще им не подвластна; я имею в виду *воздушную перспективу* или эту градацию тонов и полутонов, которая служит причиной тому, что части картины кажутся выступающими вперед или удаленными вглубь. Однако было сочтено все же уместным опубликовать этот „Опыт“ в неизмененном виде, чтобы

привлечь к этому труду большое число просвещенных наблюдателей и способствовать таким образом тому, чтобы этот предмет был значительно скорее продвинут на пути к своему совершенству.

Кроме того, не мешает заметить, что хотя наблюдения, описанные в первом разделе, были повторены весьма большое число раз, а некоторые из них были проделаны даже более сотни раз в присутствии многих лиц, зрение которых привлекалось к этим опытам, все же можно думать, что эти наблюдения не были еще достаточно точными. Столь трудно полностью удовлетвориться этого рода опытами, что почти поддаешься искушению считать их лишь простыми образцами опытов, кои могли бы быть сделаны впоследствии. Впрочем, следует не забывать, что здесь мы впервые измеряем свет и имеем счастье найти истинные принципы в этом деле и отметить вступление на путь, по которому остается лишь следовать далее.

Наблюдатели, которые пожелают повторить наши опыты, смогут внести в них большую точность: они смогут, например, различать то уменьшение, которое претерпевает свет, встречая внутренние части прозрачных тел, от того уменьшения, которое причиняют обе поверхности этих тел, отражая часть лучей. Здесь мы не различали эти два уменьшения, ибо мы полагали, что последнее из них слишком слабо в воде и стекле, чтобы быть рассматриваемым в отдельности, в особенности когда свет падает на поверхности перпендикулярно. К этому мы пришли также после некоторых опытов, ибо мы убеждались неоднократно, что свет, мешающий нам видеть в глубь воды, там, где эта глубина достигает 18 или 20 футов, оказывается обычно не тем светом, который отражается поверхностью, а светом, отсылаемым нам частицами самой среды. Чтобы убедиться в этом, я часто смотрел в морскую воду через слегка погруженную в нее трубку, нижний конец которой я закрывал куском стекла; и хотя поверхность воды не отражала более свет в мой глаз, я видел не лучше прежнего.

Иначе получалось, однако, когда, натягивая над поверхностью воды клеенку, я добивался того, что некоторый объем моря оказывался в тени, без того, чтобы та часть глубины, которую я хотел увидеть, переставала быть освещенной солнцем. Этот опыт достаточно ясно показывает, что свет, отражаемый поверхностью прозрачных тел, не столь значителен, как то можно было бы думать, и что он почти всегда слаб по сравнению с тем светом, который отсылается внутренними частями. Однако, считаясь с мнением одного из наших крупнейших физиков,* который, привыкнув вносить во все свои изыскания строжайшую точность, пожелал, чтобы в рассматриваемом здесь предмете также ничего не было упущено, мы поясняем, что всегда просто различать те два света, о которых идет речь, или различать два разных уменьшения, претерпеваемых полным светом. Если, например, идет речь о прозрачности стекла, то достаточно измерить с помощью методов первого раздела, насколько свет уменьшается, проходя сквозь кусок стекла толщиною в один дюйм, и насколько он уменьшается, проходя сквозь другой кусок толщиною в два дюйма. Это наблюдение даст нам оба полных уменьшения; иначе говоря, те уменьшения, которые причиняются как встречей с внутренними частями стекла, так и отражениями, происходящими на обеих поверхностях. Однако поскольку поверхности обоих тел предполагаются одинаково полированными, они будут отражать в точности одинаковое количество света, и таким образом все различие будет проистекать лишь оттого, что один кусок толще другого на один дюйм. Поэтому останется лишь сравнить между собой оба уменьшения или исследовать, во сколько раз одно из них более другого, чтобы узнать, насколько уменьшается свет толщею стекла в один дюйм вследствие препятствий, чинимых лучам одними лишь внутренними частями куска стекла. Касательно этого уменьшения возможно было бы затем произвести рас-

* Г-на де Реомюра. *(Примечание автора).*

четы, указанные в этом маленьком труде; и если сравнить это уменьшение с уменьшением, найденным первоначально для первого куска стекла, то можно найти ослабление, причиняемое лишь двумя поверхностями, каковое можно было бы учитывать в случае надобности. Дело будет обстоять так же и со всеми другими телами: метод является общим. Однако мы должны прибавить, что он, тем не менее, будет вполне точным лишь в том единственном случае, когда приложение его окажется абсолютно необходимо; иначе говоря, в том случае, когда поверхности будут перехватывать значительную часть света. Это будет иметь место, как известно, главным образом тогда, когда они окажутся шероховатыми или матовыми, подобно поверхности стекла, обработанного песком, и в этом случае способ даст с достаточной точностью количество света, задерживаемое при входе в тело и по выходе из него. Однако, если было бы угодно найти эту же величину в том случае, когда она незначительна, то почти всегда окажется, что неизбежные ошибки, совершаемые при наблюдениях, исказят ее в сильной мере; и даже, быть может, она отыщется в противоположной или отрицательной форме, так что из сравнения опытов будет казаться, что свет, встречая поверхности, увеличивается, вместо того чтобы уменьшаться.

П. Бугер.



Франсуа Мари

НОВОЕ ОТКРЫТИЕ, КАСАЮЩЕЕСЯ СВЕТА. О ЕГО ИЗМЕРЕНИИ И ИСЧИСЛЕНИИ ЕГО СТУПЕНЕЙ*

Предавшись однажды раздумью об устройстве барометра, термометра и гигрометра, я осознал, что изобретение их обязано частому и глубокому размышлению над многообразными воздействиями, производимыми различными качествами воздуха, как, например, теплом, холодом, сухостью, влажностью, сгущенностью или разреженностью на некоторые особые тела, такие как ртуть, винный спирт и т. д.; все эти качества воздуха вызывают в них различные движения и изменения, которые наблюдают, чтобы замечать их и отмечать ступени их различия.

Это размышление привело к убеждению, что для изобретения способа и прибора, пригодных для измерения ступеней света, надлежало бы также изучить:

1) Не оказывает ли свет на некоторые особые тела воздействия, существенно отличные от тех, которые он оказывает на другие тела?

2) Нельзя ли также наблюдать эти воздействия, чтобы отмечать некоторые однородные, регулярные или пропорциональные различия в них?

3) Не может ли, наконец, это различие, если оно однородно, регулярно или пропорционально, быть градуирован-

---

* Сокращенный перевод.[167]

ным или отмеченным и разделенным на ступени, чтобы служить для измерения и исчисления степеней света?

Здесь не мешает заметить и предупредить, что я не намереваюсь ни предложить, ни даже искать средство измерять свет сам по себе, чтобы познать всю его протяженность.

Я предполагаю искать, найти и дать способ измерять свет в его отношении к нам самим и к возможному его для нас употреблению, разделяя его на произвольные ступени, подобные ступеням барометра, термометра и гигрометра, которые разделяют и измеряют свойства давления, теплоты и влажности воздуха лишь в их отношении к нам самим, к нашему употреблению и к пользе, которую мы можем из этого извлечь.

Поразмыслив внимательно над действием света, я понял, что он может падать на тела двух родов, из которых одни прозрачны и свободно пропускают свет, другие же непрозрачны и непроницаемы для лучей, не пропуская их, а, напротив, запирая их и не давая им никакого прохода.

Первый способ измерять свет с помощью прозрачных тел, называемый прямым способом

Одни прозрачные тела пропускают лучи света совершенно свободно, как, например, чистый воздух, не возвращающий вспять и не отражающий лучи сколько-нибудь заметным образом.

Другие же пропускают лучи с большею или меньшею легкостью, смотря по степени совершенства своей прозрачности; таковы: чистая вода, слюда, стекло, хрусталь и другие еще менее прозрачные тела, которые пропускают лишь часть лучей света, возвращая вспять и отражая другую часть по направлению к их источнику.

Небо и чистый воздух не смогут послужить нашим целям, ибо они слишком прозрачны, и пригодными для нашего замысла

будут лишь те тела, которые обладают умеренною прозрачностью, ибо, отражая часть света, они тем самым ослабляют и уменьшают проходящую часть.

Отсюда я заключил, что возможно преградить свет столь большим числом частей этих умеренно прозрачных тел, что их множество, постепенно уменьшая и все более и более ослабляя этот свет, приведет к полному его поглощению, причем степени этого ослабления могут послужить нам средством вычислять и измерять степени самого света.

Я нашел, что среди всех этих тел стекло, хрусталь, слюда и чистая вода наиболее удобны и наиболее пригодны для этой цели.

Для этого достаточно взять какой-либо жолоб или картонный или жестяной тубус от зрительной трубы, поместить в нем плоские, хорошо полированные стекла в непосредственной близости друг к другу и умножать их число до тех пор, покамест они в своей совокупности не поглотят свет целиком и не приведут к полному исчезновению его в трубке.

При этом ступени света могут исчисляться по количеству этих стекол, причиняющих ему ослабление или уменьшение, если отсчитывать полное число их от первого близлежащего к глазу до последнего, обращенного к светильнику или к источнику света. Если все они имеют равную толщину и прозрачность, можно принять число этих стекол равным числу ступеней света. Ибо стекло, близлежащее глазу, которое первое позволит заметить и увидеть свет, отметит первую ступень света; второе стекло — вторую ступень; третье стекло — третью ступень, и так последовательно до последнего стекла, обращенного к светильнику или источнику света.

Свет, находящийся за этим последним стеклом, мог бы измеряться лишь по удаленности или по силе его источника, если бы мы могли знать ту и другую или обе вместе и могли бы градуировать их или измерять по ступеням.

Можно было бы также, чтобы исчислить или измерить ступени света, воспользоваться шкалою, градуированною произвольным образом вдоль канала или трубки, начиная от первого стекла, наиближайшего, как мы говорили, глазу, до последнего, обращенного к свету, и напоминающею шкалу, обычно применяемую в барометре и в термометре.

Можно было бы также, если угодно, воспользоваться цветными стеклами, например красными, зелеными, белыми, черными и т. д., как одинаковых, так и различных цветов, и сочетать их по желанию.

Вода, как мы сказали, могла бы также послужить этой цели (если только она не слишком прозрачна и не пропускает свет слишком свободно, вследствие чего лучи последнего проходят в этой жидкости весьма далеко и делают опыт чрезмерно трудным). Чтобы испытать это, надлежало бы наполнить водою жестяную или медную трубку, тщательно закрытую с обоих концов прочными, светлыми и прозрачными стеклами, из которых одно могло бы придвигаться и отодвигаться на некоторое расстояние, смотря по тому, каково количество воды, необходимое для того, чтобы заставить свет, ослабляющийся незаметно и мало-помалу в воде, наконец полностью поглотиться, исчезнуть и перестать быть видимым или каким-либо иным образом воспринимаемым. В точке, в которой свет полностью исчезнет, будет истинная тьма, а в первой точке со стороны глаза, где свет начнет быть заметным, будет первая ступень света, как и в том случае, когда мы говорили о стеклах. Разделив эту трубку на ступени, начиная от этой первой точки со стороны глаза, вплоть до конца трубки со стороны светильника, можно отсчитывать эти ступени и принимать их равными числу ступеней света, подобно тому, как исчисляются ступени теплоты на термометре.

Можно было бы также, как и в случае, когда мы говорили о стеклах, воспользоваться цветными жидкостями, например вином, пивом, отваром или какою-либо иною жидкостью любого желаемого цвета.

Вот первый способ, который пришел мне на ум и который я счел должным предложить в качестве наиболее простого и легче всего осуществимого.

Я назвал его прямым способом, ибо он осуществляется на прямой линии, идущей от светильника или источника света к глазу, и свет, проницая воду или стекла по прямой линии, претерпевает ослабление и уменьшение также по прямой линии.

Второй способ измерять свет с помощью непрозрачных тел, называемый способом отражения

Убедившись, что тела умеренной прозрачности, которая есть уже некоторый вид или начало непрозрачности, доставили мне этот прямой способ, я пожелал исследовать также непрозрачные тела, чтобы выяснить, не могут ли и они дать нам некий иной способ измерять свет.

Совершенно непрозрачные тела суть те, которые, отнюдь не пропуская свет, напротив, полностью его запирают и отсылают обратно в ту сторону, откуда он приходит, и отражают лучи либо прямо, либо косо, в сторону светильника, являющегося их источником.

Есть два сорта непрозрачных тел. Одни — грубые, шероховатые, неровные, шершавые, тусклые и лишенные всякой гладкости; они отражают лишь свет и цвета подобно земле, обычным камням и необработанным, неполированным металлам.

Другие — гладкие, ровные и блестящие, например металлические, хрустальные или стеклянные зеркала, которые не только отражают свет и цвета, но воспроизводят также форму, черты и даже движения цветных предметов и светящих тел.

Я нашел, что пригодными для нашей цели могут быть лишь тела второго типа, но не первого, и притом среди них лишь наиболее гладкие, а именно зеркала.

Действительно, я заметил:

1) Что эти отражения столь ярки и сильны, что они могут восприниматься весьма далеко и передаваться от зеркала

к зеркалу до известного предела, более или менее удаленного, смотря по силе и качеству светильника и в зависимости от яркости, интенсивности или совершенства его света.

2) Что свет, передающийся подобным образом благодаря отражению от зеркала к зеркалу, ослабляется незаметно и мало-помалу, уменьшаясь от отражения к отражению вплоть до полного погашения.

Отсюда я сделал достаточно обоснованное и правдоподобное предположение, что если бы мы могли точно наблюдать множество или число этих отражений и расстояния между ними, а также пропорцию или регулярность ступеней этого ослабления или уменьшения света в наших зеркалах, то это вполне послужило бы нам иным и весьма изящным способом измерять свет.

Этот способ показался мне даже значительно более изящным и приятным, нежели первый, гораздо более наглядным, делающим наблюдения более легкими и более удобными. Все это заставило меня остановиться на нем и принять его.

Назвав первый способ прямым, я счел необходимым дать второму название способа отражения, ибо, в отличие от первого, он осуществляется не по прямой линии, а, напротив, с помощью лучей отраженного света, которые передаются от зеркала к зеркалу под углами падения и отражения до тех пор, пока свет, ослабляясь мало-помалу от зеркала к зеркалу и уменьшаясь незаметно от отражения к отражению, не поглотится, наконец, полностью в множестве зеркал и не исчезнет совершенно, перестав быть видимым, ощущаемым или каким-либо образом воспринимаемым. Ибо последнее зеркало, например, в котором свет солнца или какого-либо иного источника будет еще виден, будет внутренним или последним пределом этого света, который может быть исчислен, градуирован или измерен по ступеням, начиная от этого последнего зеркала, близлежащего к глазу, до первого зеркала, которое прямо и непосредственно получает свет солнца или какого угодно иного источника.

Для того чтобы практически осуществить этот последний способ, надлежит наглухо затворить комнату так, чтобы наружный свет мог проникать в нее лишь через единственное отверстие сколь угодно большой или малой величины. Лучше, однако, как мне кажется, сделать его сначала, при первых испытаниях, малым, например величиною с монету в пятнадцать или тридцать су, ибо впоследствии, смотря по успешности первых опытов, нетрудно будет расширить и увеличить его.

Когда солнечные лучи проникнут в комнату через это маленькое отверстие, надо будет преградить им путь зеркалом, поставленным, однако, не прямо и не в лоб, а немного косо и не по отвесу.

Затем на таком же расстоянии и примерно с таким же наклоном поставить второе зеркало, перехватывающее лучи от первого; второму зеркалу противопоставить третье, третьему — четвертое, четвертому — пятое, пятому — шестое и так далее, сохраняя все время равные расстояния и одинаковые наклоны, до тех пор, пока будет происходить отражение и пока свет солнца не ослабнет совершенно и не перестанет быть заметным в последнем зеркале.

Тогда отдаленность и множественность зеркал или, вернее, число отражений, претерпеваемых светом в зеркалах, будут измерять ступени света, выраженные через число равномерно пропорциональных ступеней ослабления или уменьшения света в этих зеркалах.

Можно также градуировать эти ступени с помощью шкалы, построенной начиная от первого зеркала и кончая последним по прямой линии или построенной косо от зеркала к зеркалу или от отражения к отражению, начиная от первого из зеркал и кончая последним. Здесь каждый может поступать, как заблагорассудится.

Этот опыт можно начать, взяв небольшой светильник, например сальную или восковую свечу или факел (это относится как к методу отражения, так и к прямому методу), прежде

чем опробовать его с солнечным светом. При этом можно будет с удовольствием убедиться в том, что свет слабого светильника, например сальной или восковой свечи, по сравнению со светом более сильного и яркого светильника, пройдет при прямом способе значительно менее далеко и не проникнет сквозь такую большую толщу воды или сквозь столь большое число или множество стекол и даст также значительно меньшее число отражений при способе отражения. Заключая в себе значительно менее света и обладая, следовательно, меньшей силой и яркостью, он не может послать его столь далеко; сфера его действия не простирается на столь большое расстояние, как у светильника большей величины и силы.

Мне могли бы возразить, что ни один из предложенных двух способов — ни прямой способ, ни способ отражения — не представляется ни точным, ни абсолютным, но что эти способы лишь относительны и результаты будут зависеть от различия в зрении тех лиц, которые ими воспользуются. Человек со слабым зрением перестанет, например, видеть свет на двадцатом стекле или зеркале, а человек с острым зрением перестанет его видеть лишь на двадцать третьем или двадцать четвертом, а, быть может, и того более. Таким образом, это измерение света не будет ни точным, ни одинаковым, ни, стало быть, абсолютным, но всего лишь относительным и зависящим от различия в остроте зрения.

Иначе обстоит дело с термометром, барометром и гигрометром, в которых высота жидкости отмечает одну и ту же ступень теплоты, давления или влажности воздуха общим образом для всех людей. Я сам признаю это различие откровенно и чистосердечно заодно с теми, кто мог бы сделать подобное возражение.

Следует, однако, заметить, что разница между найденными мною способами измерения света и способами, существующими

для измерения теплоты, давления и влажности воздуха, заключается в том, что я измеряю свет с помощью зрения, то есть с помощью способности, объектом которой является свет, в то время как другие качества отнюдь не измеряются способностью осязания, объектами которой они являются, но измеряются, так же как и свет, зрением. И если бы их пожелали измерить осязанием, для которого они суть объекты, входя в непосредственное соприкосновение с их сущностью, то, быть может, обнаружилось бы еще большее различие и ошибки были бы еще более частыми и тяжкими, нежели при измерении света.

О том же говорят вкусовые ощущения: сладкий или кислый, приятный или неприятный вкусы никогда не бывают одинаковыми для различных людей.

То же относится ко всем чувствам и к самому зрению. Ибо, хотя мы все говорим согласно, что некая вещь бела, красна или зелена и что мел более бел, нежели молоко, тем не менее очевидно, что эти предметы не кажутся всем нам в одинаковой степени белыми, красными или зелеными и что, быть может, я усматриваю в снеге ту степень белизны, которую вы видите в молоке; так же обстоит дело и с прочими цветами и, соответственно, с иными качествами.

В ожидании того, что кто-либо более искусный, более просвещенный или более удачливый, нежели я, найдет что-либо более верное, более точное, более удобное или лучшее, я удовольствуюсь тем, что представляю на суд людей то, к чему привели меня мои размышления. Это может помочь другим продвинуть дело далее до более высокой ступени совершенства, которой я не достиг.

Что касается прибора, придуманного мною для того, чтобы служить наблюдению и измерению ступеней света с помощью способа отражения, то он создан по примеру и в подражание зрительной трубе, действие которой можно наблюдать в тщательно закрытой комнате, с помощью надле-

жащего размещения объективных и окулярных стекол, составляющих трубу. Так поступают иногда в том случае, если объективы имеют фокус в 50—60 или более футов, когда трудно или невозможно сделать удобные трубки и каналы столь большой длины. Трубки, которыми пользуются для изготовления зрительных труб, играют лишь роль закрытой комнаты, препятствуя тому, чтобы внешний свет или свет, разлитый в воздухе, помешал бы действию стекол или глаза при наблюдении в зрительную трубу; я полагаю точно так же, что при измерении света можно было бы воспользоваться вместо закрытой комнаты заменяющими ее каналами или трубками, либо круглыми, либо квадратными, сделанными из жести, картона или какого угодно другого материала, расположив в них зеркала на некотором расстоянии друг от друга так, чтобы они воспринимали отражения, необходимые для измерения ступеней света.

Я полагаю, что удобнее всего взять, как для отражения, так и для падения, углы в 45°. Это не значит, однако, что нельзя воспользоваться для этой же цели, смотря по желанию, бóльшими или меньшими углами.

Таким образом, можно было бы построить и изготовить прибор, удобный в пользовании, и дать ему название *фенгометра*, *фотометра*, или *метрофота*, если производить его от греческого языка, или, наконец, присвоить ему наименование *люциметра*, если угоднее исходить от латинского; последнее название может даже считаться произведенным вместе от греческого и латинского. Примерами тому служат термины альтиметрия и планиметрия, которые в ходу у геометров.

Это же слово люциметр представляется достаточно подходящим при изложении на латинском языке, весьма выражающим сущность вещи, легким и приятным для произношения на нашем языке.

Я представляю, однако, выбор ученым и предпочтенис обычаю и счастливой судьбе, которая выпадет на долю одного

из этих четырех названий. Пока же я буду пользоваться названием люциметр.

Поскольку Солнце перемещается по небосводу и непрестанно поднимается и опускается, совершая свой обычный путь, необходимо поставить этот прибор на шаровой шарнир, чтобы поднимать, опускать и поворачивать его, смотря по надобности, сообразуясь, таким образом, с вечным движением Солнца.

Вот способы и приборы, которые я придумал по этому поводу. Их можно было бы в дальнейшем усовершенствовать и улучшить и найти что-либо более красивое, более удобное, более совершенное и лучше придуманное или изобретенное.

Со временем возможно будет открыть те приложения нашего люциметра, какие я еще сам не усмотрел. Этими найденными со временем применениями, возможно, будут следующие:

1) Бо́льшая или меньшая мутность или ясность, чистота или загрязненность, тонкость или грубость воздуха (измеренная по ступеням), определяемая через лучшую или худшую видимость одного и того же предмета в один и тот же час, но в разные дни, или в один и тот же день, но в различные часы.

2) Различие в ступенях света в полдень летом и в полдень зимою.

3) В котором часу летом мы имеем приблизительно ту же ступень света, что в зимний полдень.

4) На сколько ступеней уменьшается свет во время солнечного или лунного затмения, начиная непосредственно от начала затмения до момента наибольшей темноты.

5) Можно было бы также с помощью прямого способа различать ступени зрения разных людей по бо́льшему или меньшему числу стекол, которые нужны одним сравнительно с другими, чтобы скрыть от них один и тот же предмет или светильник.

То же можно сказать и о многих других употреблениях, которые впоследствии могут быть найдены в зависимости от усилий, каковые будет угодно приложить для их отыскания.

Я предоставляю эти дальнейщие открытия времени, которое дает всему созреть, а также трудам и искусству ученых и любознательных людей.



ПОСЛЕСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Пьер Бугер (Pierre Bouguer, 1698—1758) — основоположник фотометрии, автор твердо вошедших в обиход науки исследований по физике, астрономии, геодезии, теории корабля, гидрографии и другим отраслям знания.* Научное наследие его в виде ряда трактатов и многочисленных мемуаров очень велико и недостаточно изучено.

Роль, отводимая в истории науки трудам Бугера, хотя и велика, но меньше той, которой они заслуживают. Известность ученых прошлого при их жизни и даже столетия спустя далеко не всегда соответствует действительному значению результатов их научной деятельности для человечества. Она в значительной мере определяется степенью их личного влияния при жизни, желанием и умением добиться признания правящих кругов, анализом их деятельности и трудов буржуазными историками науки, обычно необъективным и часто неумелым. Работа советских ученых по изучению деятельности и изданию трудов классиков науки уже многое дала для создания правильной истории науки.

---

* Старая русская транскрипция (Бугер) фамилии Bouguer'а, уроженца Бретани, фонетически правильнее (см., например, малый словарь Ляруса — „Petit Larousse") более поздних (Буге, Бугэ); она и принята в этой книге.

Бугер был скромный труженик, бóльшая часть его жизни протекла в провинциальных городах и в длительном научном путешествии. Он не блистал в придворных кругах, не искал успеха у всесильных фаворитов короля, жизнь и труд были для него синонимами. Буржуазные историки науки не сумели оценить в должной мере величия научного наследия Бугера, достойного представителя эпохи Ньютона (1642—1727), М. В. Ломоносова (1711—1765), Леонарда Эйлера (1707—1783).

Можно привести ряд примеров, подтверждающих неразумное забвение результатов многих из работ Бугера в области фотометрии. Несообразно большая роль в создании этой главы оптики была в дальнейшем приписана Иоганну Ламберту (1728—1777). Это определилось двумя основными причинами. Первая из них та, что история математической физики привлекала больше внимания, чем история экспериментальной физики. Второй, не менее существенной причиной было преобладание германской школы в науке об истории физики.

Бугер теоретически и экспериментально устанавливает один из величайших законов природы — показательный закон ослабления света при прохождении через вещество — и применяет его к рассмотрению ряда явлений. По поводу этого закона акад. С. И. Вавилов писал:

„Закон Бугера является, таким образом, одним из самых точных законов природы. Все действия света — только вторичные процессы, сопровождающие поглощение света в веществе. С этой точки зрения закон Бугера — общий закон действия света“.*

Свою книгу „L'Essai d'Optique sur la Gradation de la Lumière“ Бугер в значительной мере посвящает открытому им закону. Когда эта книга была издана, а именно в 1729 г., Ламберту было два года. Однако и поныне закон этот в бóльшей мере связывают с именем Ламберта, чем Бугера.

* С. И. Вавилов. Действия света. М., 1922.

Приведем второй пример. Бугер инструментальными измерениями устанавливает падение яркости от центра к краю солнечного диска и делает вывод, что силу света можно считать пропорциональной косинусу угла излучения лишь в самом грубом приближении. После этого Ламберт, исходя из постоянства яркости по диску солнца, как из „очевидного" в буквальном смысле этого слова, постулирует как общий закон природы пропорциональность силы света косинусу угла излучения, что на самом деле имеет место только для абсолютно черного тела.

В курсах физики до последнего времени можно было встретить в качестве доказательства „закона Ламберта" то, что солнце глазом воспринимается как плоский диск равномерной яркости, и даже указания, что Бугер занимался проверкою формулы Ламберта.

Фотометрический трактат Бугера был забыт. Иначе выведенную в нем закономерность для яркости воздушной дымки до объекта не называли бы „формулой Кошмидера", не создавали бы в XX столетии неверных теорий расчета видимости объектов сквозь воду, при наличии в трактате Бугера правильной теории, учитывающей снижение яркостного контраста вследствие рассеяния света водой. Мало кому известно, что Бугер формулировал тот психофизиологический закон, который ныне именуют „законом Вебера — Фехнера". Таких примеров можно было бы привести множество.

При изучении сочинений Бугера их содержание и сейчас захватывает своим научным интересом. Устарел инструментарий Бугера, но не его мысль.

В то время как ряд сочинений классиков науки XVIII в. сохранил до настоящего времени лишь историческую ценность, в „Оптическом трактате" Бугера современный читатель находит много для него нового и практически нужного.

Жизнь Бугера также заслуживает изучения, и не только вследствие научной значимости его трудов, но и потому, что это был ученый, обладавший чувством ответственности за практическое приложение своих знаний и опыта.

В связи с исполнившимся двухсотпятидесятилетием со дня рождения Бугера академиком С. И. Вавиловым было предложено издать в серии „Классики науки“ трактат Бугера об оптике, снабдив его комментарием, историческим очерком и необходимыми биографическими данными. Русский перевод сочинения Бугера был необходим широкому в нашей стране кругу лиц, сталкивающихся в своей исследовательской, инженерной или учебной деятельности с вопросами фотометрии и светотехники.

Трактат Бугера был издан на французском языке в 1760 г., переведен на латинский язык в 1762 г. и больше с тех пор не переиздавался. Особенно удивляться этому не следует. Русское издание „Лекций по оптике“ Ньютона является единственным полноценным переводом этой книги с латинского языка. Отметим попутно, что другой крупный труд Бугера, а именно его „Сочинение о навигации“, выдержал в свое время в русском переводе много больше изданий, чем на родине.

Настоящий перевод сделан с посмертного французского издания книги Бугера „Traité d'Optique sur la gradation de la lumière“.*

Рукопись была закончена Бугером перед самой его кончиной и издана в 1760 г. с „Предуведомлением“ академика де-ла-Кайля, друга Бугера, принявшего на себя завершение издания труда.

Трактат Бугера был издан в формате 8°. 318 страниц основного текста сопровождались 48 фигурами на семи таблицах в конце трактата. При издании настоящего перевода было решено для удобства читателей иллюстрации поместить в тексте.

---

* Отметим, что книга Бугера в этом издании, как сообщил мне В. Л. Ченакал, была в библиотеке М. В. Ломоносова (Ломоносов. Роспись иностранных книг. Архив Академии Наук СССР, фонд 20, опись 1, № 2, листы 342—349).

В трактате Бугера за „Предуведомлением“ и весьма подробным в соответствии с обычаями того времени оглавлением, могущим служить аннотацией книги, следуют, предшествуя основному тексту, выписки из постановлений об издании трактата и список опечаток. Оглавление в переводе перемещено в конец книги, постановления об издании трактата, как не имеющие отношения к его содержанию, опущены. Список опечаток содержит лишь две несущественных ошибки, которые при переводе были исправлены. Поэтому список этот также опущен. На все остальные весьма многочисленные опечатки в оригинале, обнаруженные при редактировании перевода, даются указания в Комментарии.

Большое число ошибок в оригинале, особенно в математических символах, быть может в некоторой мере обусловлено тем, что книга издавалась после кончины Бугера и набиралась с рукописи, написанной не его рукой. Отметим попутно, что в оригинале оглавление не вполне точно соответствует наименованиям глав в тексте; при переводе это устранено.

Наименования величин переведены на русский язык текстуально, а не в соответствии с принятой ныне фотометрической терминологией. Так, например, термин „force de la lumière“ передан словами „сила света“, хотя содержание этого понятия у Бугера ближе к тому, которое теперь именуют освещенностью. Подробнее об этом указано в 4-м пункте Комментария.

Математические обозначения Бугера в основном совпадают с ныне принятыми, за исключением знака : : для пропорций, что оговорено также в Комментарии. Введены скобки вместо принятого Бугером знака черты над объединяемыми буквенными обозначениями и знак Log вместо употребляемого Бугером знака L для десятичного логарифма.

„Трактат о градации света“ 1760 г. является развитием упомянутого выше более краткого фотометрического сочинения Бугера „Опыт о градации света“ (L'Essai d'Optique sur la gradation de la lumière), изданного в Париже в 1729 г. Эту книгу

и упоминает де-ла-Кайль в своем „Предуведомлении“, которым открывается трактат Бугера. Книга была переиздана в Париже в 1921 г.* Это издание в свое время подверглось справедливой критике со стороны акад. С. И. Вавилова, как совершенно не удовлетворяющее требованиям, которые следует предъявлять к изданию трудов классиков науки.** В настоящем издании приводится перевод того замечательного предисловия, которое Бугер предпослал своей книге „Опыт о градации света“. Смерть не дала ему возможности самому написать предисловие к трактату.

К русскому изданию трактата приложен также сильно сокращенный перевод брошюры Франсуа Мари „Новое открытие, касающееся света. О его измерении и исчислении его ступеней“, изданной в Париже в 1700 г. Он включен из тех соображений, что на сочинение Франсуа Мари ссылается Бугер, что ознакомление с брошюрой Мари позволяет судить об уровне суждений о количестве света предшественников Бугера, а также потому, что сам Франсуа Мари является создателем способа измерения света „методом гашения“, представляющего интерес и поныне.

Комментарий содержит примечания редактора перевода к трактату Бугера, основной целью которых является по возможности освободить читателя от большого труда толкования этого сочинения и позволить ему непосредственно применять полученные Бугером результаты. К книге приложен „Очерк жизни и трудов Пьера Бугера“. Цель очерка сообщить биографические сведения о Бугере и охарактеризовать его многогранную научную деятельность. Этот очерк далек от совершенства, что определяется, во-первых, скудостью дошедших

* Pierre Bouguer. Essai d'Optique sur la gradation de la lumière (Les maîtres de la pensée scientifique, publieé par les soins de Mourice Solovine). Paris. Gauthier — Villars. 1921, XX + 132 стр.

** С. И. Вавилов. „Пьер Бугер. Опыт о градации света“. Успехи физических наук, том IV, вып. 2—3, 1924 г.

биографических данных и, во-вторых, тем, что автор очерка, будучи оптиком, мог в меньшей мере оценить труды Бугера по астрономии, геодезии, гравиметрии, теории корабля, навигации и т. д.

Автору неизвестны сколь-нибудь обстоятельные биографические очерки о Бугере, повидимому их не было. Данные о его жизни пришлось подбирать по многочисленным и разнородным источникам. Многое удалось заимствовать из „Похвального слова о Бугере" („Éloge de Bouguer"), произнесенного в Парижской Академии Наук после его кончины и опубликованного в Мемуарах этой Академии за 1758 г. Ряд полезных сведений можно было получить из многотомного труда по истории точных наук Монтюкла (J. Montucla. Histoire des Mathématiques) и из сочинений по оптике и ее истории периода XVIII и XIX веков. Статьи о Бугере в энциклопедических словарях очень сжаты, наиболее содержательные из них принадлежат физикам — Био (J. B. Biot, 1774—1862) в пятом томе Biographie Universelle Michaud (Париж, 1854) и Ф. Ф. Петрушевскому (1828—1904) в энциклопедическом словаре Брокгауза и Ефрона.

Полезными оказались 17 писем Бугера к его другу Леонарду Эйлеру, хранящиеся, как было установлено автором, в Архиве Академии Наук СССР. Можно высказать некоторое удивление по поводу того, что представители французской науки, располагающие подавляющим большинством архивных материалов о деятельности Бугера, не написали подробной его биографии.

В „Очерке жизни и трудов Пьера Бугера" приведены данные об изданиях сочинений Бугера по морскому делу в России. Там же приложен список работ Бугера; его нельзя признать совершенным, поскольку он лишь частично проверен по подлинным сочинениям.

В приложенной статье о Бугере дан также исторический очерк развития представлений о количестве света и способах его измерения до Бугера и приведена оценка содер-

жания и значения трактата Бугера об оптике для современного читателя.

Фотометрия, в связи с общими путями развития оптики и успехами светотехники, приобретает все бо́льшее значение. В ее развитии крупную роль сыграли и играют работы русских и советских ученых. Можно думать, что издание снабженного комментариями и дополнительными статьями трактата Бугера на русском языке будет способствовать развитию этой важной и увлекательной отрасли знания.

В заключение необходимо отметить, что переводчики Н. А. Толстой и П. П. Феофилов и редактор на протяжении всего своего совместного труда неизменно пользовались доброй помощью акад. С. И. Вавилова.

А. А. Гершун.

Ленинград, 1950.



ОЧЕРК ЖИЗНИ И ТРУДОВ ПЬЕРА БУГЕРА

1. Биография Пьера Бугера

Пьер Бугер родился 10 февраля 1698 г. в городе Круазик в Нижней Бретани.

Чтобы нагляднее охарактеризовать историческую эпоху, в которую жил Бугер, отметим, что в год его рождения двадцатипятилетний Петр Первый был в Англии, где изучал кораблестроение, и, предположительно, встречался с другим замечательным человеком того времени — Исааком Ньютоном, которому было уже пятьдесят шесть лет.*

Во Франции это был „век Людовика XIV“ — мрачное время абсолютизма. Земледельцы, составлявшие подавляющее большинство населения страны, находились в состоянии крайней нищеты и угнетения. В это время уже начинался упадок абсолютной монархии, разрушались феодальные отношения, вызревал капиталистический уклад. Франция боролась за морское и колониальное преобладание. Экономическому и политическому развитию сопутствовали рост естественно-научного мышления, борьба за свободу мысли. Роль Франции среди других стран в политике, науке и искусстве была велика.

Бретань — родина Бугера — полуостров, образующий крайний северо-западный угол Франции, клином выдвинувшийся

* Акад. С. И. Вавилов. Исаак Ньютон. Второе издание. Изд. Академии Наук СССР, 1945.

в Атлантический океан. Суровая по природе и географически обособленная эта часть Франции сохранила и по настоящее время много своеобразного. В ее жизни особо большую роль играло и играет море, и с морем неизменно были связаны научные интересы Бугера.

В портовых городах побережья Бискайского залива протекли детство и юность Бугера. Круазик, в котором он родился, — маленький приморский городок, расположенный у северной оконечности устья Луары, в 25 км севернее города Сен-Назер. Теперь Круазик административный центр кантона в департаменте Нижней Луары и в нем проживает около 2500 жителей. В XVIII в. Круазик оказал героическое сопротивление англичанам во время Семилетней войны.

Родители Пьера Бугера — Франсуаза Жоссо и Жан Бугер. Влияние отца на формирование творческого гения сына было исключительно велико. Жан Бугер был „королевским профессором гидрографии“ в Круазике. Такое звание соответствовало во Франции должностным лицам на морской службе, руководящим в коммерческих портах курсами по подготовке к экзаменам будущих капитанов дальнего и каботажного плавания. Отметим, что гидрографическое училище в Круазике продолжало существовать и до последнего времени.

Но Жан Бугер был не только одним из наиболее выдающихся, для своего времени, знатоков теории и практики морского дела, а и ученым, искушенным в особенности в физико-математических науках, чем не отличалось большинство его коллег. Написанный им полный курс навигации выдержал два издания. Первое вышло в 1698 г., в год рождения Пьера, второе — в 1706 г.*

В должном соответствии с наименованием, написанный им трактат был действительно исчерпывающим по полноте, он заслужил всеобщую положительную оценку и получил широкую

* Traité complet de la Navigation. Par le Sieur Bouguer, Professeur Royal d'Hydrographie. A Paris, 1698, in 4°.

известность. Как писал живший в XVIII в. автор многотомной истории точных наук Жан Монтюкла: „курс столь хороший, сколь позволяло состояние навигации в ту эпоху".* Отметим, что этот курс был в дальнейшем полностью переработан и значительно дополнен Пьером Бугером и издан им в 1752 г. Жан Бугер читал также курс математики.

Отец скончался, когда Пьеру было 15 лет, т. е. примерно в 1713 г.

Первые слова, которым внимал юный Пьер, и первые предметы, представлявшиеся его взорам, относились к морскому делу, астрономии и гидрографии, и язык этих наук стал с ранних лет его родным языком. Уроки и наставления отца не могли не способствовать развитию врожденных талантов мальчика.

Пьера отдали (повидимому в возрасте около десяти лет) учиться в иезуитский коллегиум в Ванне, в портовом городе, расположенном несколько севернее его родного Круазика. Следует напомнить, что в то время почти все образование во Франции было в руках католического духовенства, уделявшего в своих интересах исключительное внимание педагогической деятельности. Иезуитские коллегиумы были закрытыми учебными заведениями с интернатами, срок обучения в них исчислялся шестью годами, причем первым классом считался самый старший.

Автор посвященного памяти Бугера „Похвального слова", произнесенного в Академии в Париже после кончины Бугера, приводит следующие примеры, характеризующие талантливость мальчика.

Когда Пьеру было одиннадцать лет и он учился в пятом классе, учитель решил испытать его математические способности. Удостоверившись в них в полной мере, он предложил Бугеру, чтобы тот сам преподавал ему математику. Пьер согласился. Учитель же обучал его литературе.

---

* J. Montucla. Histoire des Mathématiques (Париж, 1798).

Через два года мальчику представился другой случай доказать свои способности. Один из преподавателей математики выдвинул мало обоснованное математическое положение. Пьер, тогда ученик третьего класса, дерзнул его опровергнуть. Математик почувствовал себя оскорбленным и, будучи уверенным в своем превосходстве над мальчиком тринадцати лет, пренебрежительно вызвал его на диспут, предполагая, что он не примет этот вызов. Однако Пьер публично сразил своего противника и принудил его к молчанию. Этот успех победителя был столь чувствительным для побежденного, что тот, как говорит автор „Похвального слова“, не смог перенести стыда и покинул город.

Бугер еще не кончил обучения, когда умер отец, оставив ему и брату более чем скромное состояние. К счастью, глубокие и широкие знания Бугера дали ему достаточно оснований занять должность, исполнявшуюся раньше отцом. Но удалось это ему, однако, с трудом. Королевский профессор гидрографии Обер, назначенный министром в качестве экзаминатора, устрашился юности Бугера и вначале отказывался его выслушать. Действительно, можно ли было доверить такую должность ребенку пятнадцати лет? Пьер убеждал его, что ученость не знает возрастного ценза, и просил экзаменовать его и притом со всей строгостью, не допуская никаких скидок на несовершеннолетие. Обер, в конце концов, согласился. Юный кандидат настолько удовлетворительно отвечал на все вопросы и выявил при этом такие способности, что ушел с экзамена, выслушав много похвальных слов своего экзаминатора, и вскоре получил испрашиваемую должность.

Несмотря на все дарование Бугера, ему, конечно, было более чем трудно исполнять ее. Его ученики были, почти поголовно, старше своего учителя. Однако молодой преподователь вносил в свои лекции столько мастерства и вместе с тем достоинства, что скоро снискал себе уважение и привязанность учеников. Он обладал искусством заставлять людей любить свои обязанности и добровольно их выполнять.

Все свободное от преподавания время, а его оставалось немного, Бугер отдавал науке — физике, астрономии и морскому делу.

Его лекции и изыскания постепенно стали привлекать к себе все больше внимания. В Анжере, куда ездил Бугер, он познакомился с влиятельным академиком Рейно. Последний проявил к нему большое участие. Он рассказал о юном провинциальном математике своему другу академику Мерану (1678—1771). Меран — физик и математик — в 1734 г. был избран почетным членом Академии Наук в Петербурге.*

Меран своими трудами и личным участием сыграл существенную роль в научном становлении Бугера. Именно его работы привлекли внимание молодого ученого к вопросам фотометрии.

Меран опубликовал в 1721 г. в мемуарах Парижской Академии свой доклад, в котором поставил вопрос о влиянии потерь света в атмосфере на количество тепла, поступающего к земле от солнца летом и зимой

Меран указал, что при суждениях о количестве тепла от солнца нельзя ограничиваться учетом различия в угле падения солнечных лучей на землю. По свидетельствам историков науки, это обстоятельство ускользало от также интересовавшегося этим вопросом английского астронома Галлея (1656—1742), прославившегося своими изысканиями о кометах. Меран считал необходимым принимать во внимание, что зимою, при низком солнце, лучи его пронизывают бо́льшую толщу атмосферы, чем летом, когда солнце высоко. Меран поставил перед физиками казавшуюся неразрешимой в то время задачу

---

* Б. Л. Модзалевский. Список членов Императорской Академии Наук 1725—1907. СПб., 1908.

Деятельность Мерана очерчена в книге: J. Bertrand. L'Académie des sciences et les académiciens de 1666 a 1793. Paris, 1869. В этой же книге можно почерпнуть и некоторые данные о жизни Пьера Бугера.

об оценке прозрачности атмосферы путем сопоставления света от солнца при разных его высотах, например в зимнее и летнее солнцестояние.

Эта задача привлекла внимание Бугера. Вот что он пишет по этому поводу в предисловии к своей первой книге по фотометрии „Опыт о градации света“ [4]: *

„Прочтя этот мемуар с тем вниманием, коего не могут не заслуживать все труды, вышедшие из рук этого знаменитого академика, я не смог более сдержать желание изыскать некоторые способы, дабы произвести указанные им измерения. Г-н де Меран высказывался о них лишь предположительно, поскольку он не говорит о них в своем сочинении; он отмечает, однако, ссылаясь на г-на Гюйгенса, что ежели они и будут крайне трудны, то все же мы не вправе отчаиваться в их успехе. Это и побудило меня произвести попытку измерить силу света от Луны при двух различных ее возвышениях; привлеченный после того простотой метода, на коем я остановился, я изыскал ему другие приложения...“.

Так возникла первая работа Бугера. В разделе „Истории Академии наук“ за 1726 г., посвященном различным наблюдениям по общей физике, содержится изложение результатов исследования по „сравнению силы света Солнца, Луны и многих свечей“ [1]. Бугер решил задачу сопоставления освещения от небесных светил путем применения свечей в качестве источника света сравнения.

Фотометрии посвящены и первая работа Бугера и его последний бессмертный труд „Оптический трактат“, который он сдал в печать уже за несколько дней до своей кончины. Вопросы измерения света интересовали Бугера на протяжении всей его жизни, и именно за постановку и разрешение их ему, пожалуй, больше всего признательно человечество.

---

* Цифры в квадратных скобках обозначают порядковые номера по списку, печатных трудов Бугера (стр. 401).

Первая работа Бугера была опубликована им только в двадцативосьмилетнем возрасте. Это был результат его оторванности от столицы, Академии Наук, от всей научной жизни Франции. Должность преподавателя гидрографии в маленьком городке ограничивала круг его деятельности.

Меран сыграл определенную роль и в появлении следующего труда Бугера, посвященного морскому делу. Рейно рассказал Мерану о вызвавшей его восхищение работе Бугера по мачтовому оснащению кораблей. Меран выразил пожелание ознакомиться с ней. Прочитав ее, он предложил своим товарищам по Академии, которые вместе с ним должны были устанавливать премиальную тему на 1727 г., объявить конкурс на лучшее исследование по искусству ставить мачты на кораблях, поскольку на эту тему можно было ожидать представления великолепного труда.

Сочинение двадцатидевятилетнего Бугера получило награду Академии и вызвало единодушное одобрение математиков [2]. Меран дал самый похвальный отзыв этому труду и изложил его содержание в письме, опубликованом в „Journal des Savants“ за 1728 г.

За первым успехом Бугера последовали другие. Он получил награды Академии за сочинения: в 1729 г. на тему о наилучшем способе наблюдать в море высоты светил [3] и в 1731 г. на тему о наиболее пригодном способе наблюдать в море склонение магнитной стрелки компаса [5].

Первые его работы и окружавшая обстановка определили круг основных научных интересов Бугера на всю его жизнь. Это — фотометрия, астрономия и ее приложения, морское дело.

В 1729 г. вышла книга Бугера „Опыт о градации света“ („L'Essai d'Optique sur la gradation de la lumière“) [4]. Этот труд может рассматриваться, с одной стороны, как развитие работы 1726 г., а с другой, — как первое издание его оптического трактата, вышедшего посмертно в 1760 г. и охватывающего значительно более широкий круг вопросов. В первом

разделе книги 1729 г. описываются предложенные Бугером способы измерения света и их применения, в частности, к сопоставлению света солнца и луны, измерению потерь света при его прохождении через атмосферу и морскую воду. Второй, третий и четвертый разделы книги посвящены установлению экспоненциального закона ослабления света при его прохождении через поглощающую среду и рассмотрению следствий из этого закона. В последнем, пятом, разделе книги этот закон применяется к случаю прохождения света через среду с неравномерной плотностью и, в частности, через атмосферу.

На последних страницах книги приведена таблица воздушных масс, пронизываемых светом небесных тел при разных их возвышениях, и вызываемого этими массами ослабления света.

„Оптический трактат“ 1760 г. значительно шире по содержанию, чем „Опыт о градации света“ 1729 г., но и в этой первой книге уже заложены основные положения фотометрии. Особое значение имеет установленный Бугером закон ослабления света, который, как показали прошедшие столетия, занимает в сокровищнице человеческих знаний существенное место как один из особо важных и наиболее общих законов природы.

Физический гений Бугера полностью проявился в этом труде, содержащем описания весьма тонких и совершенно новых для того времени экспериментов. Книга Бугера свидетельствовала об умении ее автора сочетать искусство наблюдения и науку анализа результатов наблюдений.

В 1730 г. Бугер был переведен из Круазика королевским гидрографом в Гавр — крупный порт у устья Сены. В дальнейшем должность королевского гидрографа в Круазике была достойно замещена братом Пьера Бугера, также, повидимому, талантливым человеком, поскольку его лекции и публичные доклады привлекали в этот город большое число желающих обучаться молодых людей.

После столь многих и общепризнанных доказательств своих исключительных научных способностей Бугер мог рассчитывать на внимание Академии. Переезд в Гавр приблизил его к Парижу, и 5 сентября 1731 г. Академия наук вводит его в свой состав со званием associé — геометра, на вакантное, после перевода Мопертюи в члены-пенсионеры Академии, место.*

Как пишет автор „Похвального слова", никогда академик не был более точен в исполнении своего долга перед Академией и народом, и пребывание Бугера в Гавре, вне Парижа, сказывалось только на его посещениях заседаний. Бугер, войдя в состав Академии, представляет ей прекрасные мемуары по астрономии, механике, строительному делу [6—11].**

В связи с мемуаром 1734 г. на конкурсную тему о причине наклона планетных орбит к солнечному экватору необходимо отметить следующее. Во времена Бугера еще шла острая борьба между сторонниками Ньютона и картезианцами — приверженцами мировоззрения Декарта, разделившая ученый мир на два враждебных лагеря.

Сущность астрономической теории Декарта образно изложена в книге Фонтенеля, переведенной на русский язык под

* „Пенсионеры составляли основное рабочее ядро Академии; среди них было по три геометра, астронома, механика, анатома, химика и ботаника, секретарь и казначей. Следующую группу составляли двадцать associés („присоединенных"), а именно по два на каждую из указанных шести секций". (Из статьи Н. И. Идельсона в книге: Клеро. Теория фигуры Земли. Изд. Академии Наук СССР, 1947).

** 1731 г. — „О криволинейном движении тел в движущихся средах" [6].

1732 г. — „О новых кривых, которые можно именовать линиями преследования (lignes de poursuite) [7].

1733 г. — „Об ударе жидкости" [8].

1734 г. — „О кривых линиях, пригодных для образования купольного свода" [9].

1734 г. — „Сравнение двух законов, которым Земля и другие планеты должны подчиняться в отношении фигуры, которую их заставляет принимать сила тяжести" [10].

1734 г. — „Беседы о причине наклонности орбит планет" [11].

наименованием „Разговоры о множестве миров господина Фонтенеля, Парижской Академии наук секретаря“ знаменитым впоследствии сатириком Антиохом Кантемиром.*

Приведем описание Декартовых вихрей по Фонтенелю: „Планеты несутся по небесному веществу, которое есть чрезмерно тонко и двигательно. Все сие собрание небесного вещества, от солнца до звезд неподвижных, ворочается вкруг, и, таща с собою все планеты, побуждает их двигаться одним образом около солнца, которое пребывает в центре... И самое солнце около себя самого ворочается, понеже находится оно в самой средине того небесного вещества. Таков-то есть великий вихрь, которого солнце есть яко господин; но между тем планеты составляют себе маленькие партикулярные вихри, подобные вихрю солнечному. Всякая из тех планет, обращаяся около солнца, ворочается и около себя самой, и понуждает около себя ворочаться, тем же образом и на ту ж сторону, часть некую вышеупомянутого небеснаго вещества“.

Теория всемирного тяготения Ньютона нанесла смертельный удар картезианским воззрениям, но во времена Бугера, особенно во Франции, борьба эта еще далеко не была завершена. Вот что писал по этому поводу акад. А. Н. Крылов:

„В настоящее время Декартова теория вихрей не только совершенно оставлена, но и совершенно забыта в физике; во времена же Ньютона и еще лет двадцать после его смерти ее упорно придерживались, в особенности Парижская Академия наук. Предложив, например, на премию вопрос о теории приливов, она, разделяя в 1740 г. эту премию между сочинениями Даниила Бернулли, Маклорена и Эйлера, строго математическими и основанными на законе тяготения, присоединяла к ним и сочинение иезуита аббата Cavaleri, основанное на карте-

---

* Проф. Б. Е. Райков. Очерки по истории гелиоцентрического мировоззрения в России. Второе издание. Изд Академии Наук СССР, 1947.

зианских воззрениях, мотивируя свое решение тем, что Академия не признает возможным отдать предпочтение которой-либо из двух систем — Ньютоновой или Декартовой".*

Ньютон показал, что теория Декарта, согласно которой кометы и планеты переносятся вокруг солнца вихрями, противоречит фактам, в частности наблюденным эксцентриситетам орбит и закону Кеплера. Бернулли в работе „Новые размышления о теории Декарта", удостоенной в 1730 г. премии Академии, показывает, что при некоторых предположениях (сочетание вращения вихря с колебанием, изменение плотности вещества вихря обратно пропорционально корню квадратному расстояния от центра) можно удовлетворить наблюденным фактам и исходя из теории Декарта. С возражениями Бернулли выступают Деламбер и Бугер. Бугер в своем мемуаре 1734 г. [11], не ограничиваясь возражениями чисто математического характера, в частности оспаривая устойчивость такого вихря, пишет следующие замечательные слова:

„Если дело касается вихрей, один предположит эфир более плотным у центра, другой, пытаясь объяснить какое-нибудь явление, придает эфиру бо́льшую плотность у периферии, третий придет к выводу об одинаковой плотности всех слоев. ... И после этого, снабдив объяснениями все на свете, вы увидите с удивлением, что на деле ровно ничего не объяснено, и будете вынуждены стать в конце концов ньютонианцами". **

Заметный след в истории науки оставил также второй из представленных Бугером в 1734 г. мемуаров, а именно о форме, которую должны были принять земля и другие планеты под влиянием силы тяжести [10]. Эта работа посвящена необходи-

* Примечание 4 акад. А. Н. Крылова к книге 1 „Математических начал натуральной философии" Ньютона (Петроград, 1915).

** А. Д. Люблинская. К вопросу о влиянии Ньютона на французскую науку. „Исаак Ньютон" — сборник статей под редакцией акад. С. И. Вавилова. Изд. Академии Наук СССР, 1943.

мым и достаточным условиям равновесия вращающейся жидкой фигуры, — вопросу, который привлекал внимание многих крупнейших ученых, в том числе Гюйгенса и Ньютона, и который получил окончательное и строгое разрешение в трудах А. М. Ляпунова. Для характеристики значения мемуара Бугера достаточно отметить, что именно он побудил Клеро (1713—1765) провести изыскания, приведшие к его классическому труду „Теория фигуры Земли". В этой книге Клеро следующим образом характеризует сущность работы Бугера:

„Этот искусный геометр, занимаясь определением фигуры планет в предположениях гораздо более общих, чем это делалось до него, нашел, что в бесконечном множестве случаев фигура, получаемая из условий равновесия всех столбов жидкости от центра до поверхности, не совпадает с фигурой, необходимой для того, чтобы поверхность во всех ее точках пересекалась перпендикулярно направлением силы тяжести".

В трактате Клеро и приложениях к русскому его переводу, составленных Н. И. Идельсоном, можно найти и краткое изложение и оценку рассматриваемого мемуара Бугера.*

Пребывание Бугера вне Парижа могло явиться непреодолимым препятствием к его переводу в члены-пенсионеры Академии, то есть в ее основное рабочее ядро. Однако все же он очень скоро, предположительно в 1735 г., перешел в основные члены Академии, став в тридцать семь лет ее астрономом-пенсионером, и это произошло в связи с обстоятельством, сыгравшим чрезвычайно большую роль в жизни Бугера.

Академия наук в Париже решила отправить научные экспедиции, одну — к экватору, другую — к полярному кругу, с заданием измерить длину градуса меридиана, чтобы узнать, как

* А. Клеро. Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики. Комментарии и редакция Н. И. Идельсона. Серия „Классики науки". Изд. Академии Наук СССР, 1947, стр. 19, 63, 249, 269.

отклоняется форма земного шара от сферы. Но в это время один из академиков, который должен был войти в экваториальную экспедиционную группу, опасно и надолго заболел. Его нужно было заменить, и выбор Академии и морского министра графа де-Морепа, влиятельного покровителя наук и, в частности, намечаемых геодезических экспедиций, пал на Бугера. Учитывая научные заслуги Бугера и желая компенсировать его за необходимость оставления должности гидрографа, ему было присвоено высокое звание астронома-пенсионера. Так, войдя в основной состав Академии, Бугер вместе с тем на длительный срок покидал Францию.

Намечавшиеся экспедиции глубоко волновали весь ученый мир и привлекали к себе широчайшее общественное внимание. Какова форма земли, насколько она отлична от сферы, сжата ли она у полюсов или у экватора и насколько? Интерес к этому вопросу определялся даже не столько естественным стремлением знать форму того тела, на котором обитает человечество, сколько тем, что в глазах современников предстоящие геодезические измерения были своеобразным experimentum crucis, который должен был или утвердить ньютонианскую систему мира, окончательно сокрушив картезианскую, или показать неправильность космологии Ньютона, основанной на действии сил тяготения. Это был не только общий вопрос физики, механики и математики, но и вопрос мировоззрения, философии.

Рассматривая огненно-жидкую землю как уединенную в пространстве вращающуюся жидкую массу, части которой притягивают друг друга и на которые действует центробежная сила, возрастающая от полюса к экватору, Ньютон пришел к выводу, что земля должна была принять форму сфероида, сплюснутого у полюсов, и рассчитал, насколько полярный диаметр земли должен быть короче экваториального. Работами других ученых и по преимуществу Клеро теория формы земли, построенная, исходя из действия сил всемирного тяготения, была значительно усовершенствована. Из Декартовой теории вихрей

следовало обратное, а именно, что земля сжата по экватору. О форме земного сфероида, очевидно, можно было судить по изменению с широтою кривизны земного меридиана или, иначе говоря, по изменению с широтою длины одного градуса меридиана.

Если прав Ньютон, длина градуса земного меридиана должна возрастать при переходе от экватора к полюсу. Результаты измерений астрономов Кассини, произведенные во Франции вдоль Парижского меридиана, противоречили теории Ньютона; как окончательно выяснилось в дальнейшем, это было обусловлено тем, что малое расстояние точек по широте вызывало, при несовершенстве инструментария того времени, несообразно большую погрешность. Однако французские ученые отстаивали точность своих измерений. Среди них было мало таких последовательных ньютонианцев, как Бугер или Вольтер, который наносил беспощадные удары своим соотечественникам картезианцам. Англичане, ссылаясь на Ньютона и на наблюдения над маятниками, показавшие, что сила тяжести возрастает от экватора к полюсам, подвергали результаты французских измерений законному сомнению. Для решения затянувшегося спора, столь важного для науки и обостренного национальными чувствами, очевидно следовало провести новые, независимые измерения градусов долготы в столь разных широтах, чтобы расхождение отчетливо выявилось при точности измерений того времени.

Поэтому Академия и решила провести измерения в возможно далеко отстоящих по широте точках земного шара.

Несмотря на войны, которые вела Франция, было разрешено отправить две экспедиции и санкционировано предоставление необходимых средств. Одна экспедиция была направлена в экваториальную Америку, в Перу; другая — на крайний север, в Лапландию.

Для экспедиций были специально изготовлены первоклассные по тому времени приборы, необходимые для измерения расстояний при триангуляционных работах и проведения парал-

лельных астрономических обсерваций. Каждая экспедиция брала с собой один из двух изготовленных железных, полированных жезлов по одному туазу длиною, чтобы обеспечить единство мер.

Отметим, что „перуанский туаз“, которым пользовался Бугер и другие участники южной экспедиции, служил основным эталоном при установлении позднейших, в том числе метрических, мер длины.

В начале, в 1735 г., отправилась в многолетнее путешествие южная группа. „Полярники“ выехали в 1736 г. к Северному полярному кругу, в Лапландию. Эту экспедицию возглавил знаменитый математик Пьер-Люи-Моро де-Мопертюи (1698—1759); в ее состав входили в числе других Клеро, Камюс, Лемонньe и присоединившийся к ним в Стокгольме Цельзий, занимавший должность профессора астрономии в Упсале. Эта экспедиция оказалась весьма краткой; участники ее вернулись через 15 месяцев, подтвердив своими измерениями теорию Ньютона. Они первые были согреты лучами славы. Как сказал Вольтер: „Мопертюи приплюснул и землю и Кассини“.

Обратимся к южной, перуанской группе. В ее состав вошли три академика: Бугер, де-ла-Кондамин (1701—1774), Годен (1704—1760), а также ботаник и доктор Жюссье (1704—1779), хирург Сеньерг, один морской инженер, один часовщик и еще несколько лиц. Эта группа выехала из Франции в 1735 г., ее изыскания заняли много лет. Большинство ее участников вернулось во Францию в 1742 г.; Бугер, пропутешествовав 9 лет, возвратился в 1744 г., де-ла-Кондамин в 1745 г., Жюссье — в 1771 г., пробыв в Перу 36 лет.

Ученые путешественники избрали местом измерений долину реки Квито в Перуанских Кордильерах Южной Америки, пересекающую почти под прямым углом экватор. Долина расположена вблизи города Квито (правильнее Кито), теперешней столицы республики Эквадор, которая тогда входила в пределы перуанского вице-королевства — земли дружествен-

ного испанского короля. До захвата в середине XVI в. испанцами город Квито был столицей государства инков.

Экспедиция погрузилась в Ла-Рошелли (порт на побережьи Бискайского залива) на корабль, который отчалил 16 мая 1735 г. Корабль под парусами сравнительно быстро пересек Атлантический океан, прошел остров Мартиника и в середине июля достиг порта Санто-Доминго на острове Гаити, тогда французской колонии. Экспедиции еще предстояло трудное и долгое сухопутное путешествие, чтобы достичь расположенного у противоположного, тихоокеанского побережья Перуанского вице-королевства. Перевалив через Дариенский хребет, расположенный в южной части Панамского перешейка, по теперешней границе между Панамой и Колумбией, экспедиция прибыла в Лиму, столицу Перу, лишь в мае 1736 г., т. е. через год после выезда из Франции.

Город Квито расположен почти на экваторе (0°14′ южной широты), на высоте 2900 м над уровнем моря, на горном плато, у подножья действующего вулкана Пичинша. Климат в районе Квито прохладный и ровный, там всегда весна.

Экспедиция проложила в раскинувшейся по меридиану долине реки Квито цепь из 32 треугольников, протянувшуюся более чем на 3°. Большая длина дуги должна была способствовать точности измерений. На опорных точках был воздвигнут ряд пирамид.* Крайний северный пункт (0° 2′ 30″ северной широты) был расположен около города Квито, крайний южный (3° 4′ 30″ южной широты) — около города Куэнка. Расстояние между этими точками было возможно точно найдено в результате триангуляционных измерений, а разность широт определена из одновременных астрономических наблюдений в этих пунктах. Это позволяло вычислить длину градуса меридиана у экватора. В Квито астрономические наблюдения вел Бугер, в Куэнка — де-ла-Кондамин.

* De la Condamine. Histoire des Pyramides de Quito. Paris, 1751.

Решение поставленной задачи требовало много мужества от ее участников. Трудно было производить триангуляционные работы в горных условиях, — ведь самая низкая точка триангуляции была на высоте около 2.5 км. Мешали и нападения индейцев. Последние часто разрушали тригонометрические знаки, так что на одной точке их пришлось возобновлять семь раз. Жизнь путешественников подвергалась опасности и во время труда и в немногие часы отдыха. Так, например, 29 августа 1739 г. во время боя быков в Куэнка, повидимому в результате подстрекательства местной администрации, произошло массовое нападение зрителей на присутствовавших французских академиков и их спутников. Упомянутый выше участник экспедиции хирург Сеньерг умер от ран через четверо суток. Бугер был сбит с ног камнем, едва избежал удара шпаги.

Обо всем живописно и с приложением гравюры и выдержек из ряда документов повествуется в „Письме госпоже*** о народном мятеже, возбужденном в городе Куэнка в Перу 29 августа 1739 г. против членов Академии наук, посланных для измерения Земли“.*

Несмотря на все трудности, измерения были успешно завершены и вместе с работами Лапландской экспедиции и новыми измерениями в самой Франции, произведенными под руководством Кассини и астронома де-ла-Кайля, друга Бугера и впоследствии издателя его трактата, окончательно установили сжатие земного шара и определили точно степень этого сжатия.

---

* „Lettre a Madame*** sur l'émeute populaire exoiteé en la ville de Cuenca de Perou, le 29 d'Août 1739 contre les Académiciens des sciences, envoyés pour la mesure de la Terre“, 1746; Pièces justificat. pour servir de preuve a la plupart des faits allégues dans la lettre precedente, 1745.

Встречаются указания, что автором этого сочинения является Бугер. Однако это не так, поскольку в тексте имеется фраза: „я и г-н Бугер“ Возможно, что автором является де-ла-Кондамин.

Для длины 1° меридиана были получены следующие данные:

Лапландия	57 422 туаза
Франция	57 084 „
Перу	56 748 туаз

Работы экспедиции не ограничивались градусными измерениями. Об этом убедительно свидетельствуют мемуары, пересланные Бугером во Францию за годы экспедиции.

Бугером и да-ла-Кондамином были проведены наблюдения над маятником. Маятником служила свинцовая чечевица, подвешенная на нити из алоэ. Период колебания определялся путем одновременного наблюдения взятых из Франции астрономических часов, что позволяло найти ускорение силы тяжести. Этому вопросу посвящен пересланный Бугером в Париж мемуар „О длине маятника в жарком поясе“ [12].

Бугером было выполнено также исследование, которое можно рассматривать как один из истоков гравиметрии. Изложим вкратце его сущность, следуя В. Витковскому.* Бугер экспериментально показал, что местные притяжения, например гор, сказываются на направлении силы тяжести. Мысль о возможности обнаружения непосредственным наблюдением отклонения отвесной линии притяжением горы была высказана еще Ньютоном, но первое действительное измерение этого рода было выполнено Бугером. Он избрал две точки, лежащие на одной параллели к югу от потухшего вулкана Чимборазо, одной из величайших гор мира (ее высота 6272 м над уровнем моря). Одна точка была выбрана на меридиане, проходящем через предполагаемый центр тяжести этой горы, другая — значительно западнее. Произведенные наблюдения и вычисления показали, что хотя обе точки и лежат на одной параллели сфероида, однако их астрономические широты вследствие притяжения горы различаются почти на 8″. На такой угол отклонялся отвес в сторону к горе, когда Бугер проводил наблюдения на ее склоне [22].

* В. Витковский. Практическая геодезия. СПб., 1898.

Формула Бугера для редукции силы тяжести служит и поныне.*

Оценка дальности видимости покрытой снегами вершины Чимборазо позволила Бугеру выполнить расчеты воздушной дымки и рассеяния света воздухом. Об этом он пишет в пятом разделе третьей книги оптического трактата [36].

Бугер совершает с барометром ряд восхождений на наиболее высокие из доступных вершин Перуанских Кордильер для того, чтобы изучить изменение давления с высотой. После этого он спускается к Тихому океану и проводит полтора месяца на пустынном острове, с которого он измеряет высоты над уровнем моря тех вершин, на которых он проводил наблюдения. Это позволяет Бугеру дать способ определения высоты гор, который он попутно излагает в своем оптическом трактате. Повидимому, Бугер был первым исследователем, практически применившим барометрическую формулу Галлея.

Бугера можно признать хорошим альпинистом. Он совершал восхождение на Чимборазо, хоть и не на самую вершину (первое восхождение удалось в 1880 г.), но все же на высоту свыше 4.5 км. Еще замечательнее то, что на вершине горы Пичинша Бугер пробыл три недели, проводя измерения барометром и термометром, а высота этой горы, по измерениям Бугера, 2430 туаз над уровнем моря, то есть около 4.7 км.

Бугер определял высоту облаков, внимательно изучал высоту линии вечных снегов.

На высокогорные измерения Бугера ссылается М. В. Ломоносов в своих сочинениях: „О морозе, случившемся после теплой погоды в апреле месяце сего 1762 г.“ и „Прибавления к экспериментальной физике“.**

---

* Н. Идельсон. Теория потенциала и ее приложения к вопросам геофизики. Гос. техн.-теор. изд., 1932.

** М. В. Ломоносов, Сочинения, т. VI. Изд. Академии Наук СССР, 1934.

Бугер проводит ряд наблюдений астрономической и земной рефракции, сопоставляя рефракцию в тропических и умеренных широтах, определяя ее на разных высотах, изучая миражи. По этому вопросу Бугер посылает мемуар [14] в Парижскую Академию наук и создает в дальнейшем весьма полезную для астрономии теорию рефракции; в числе его последователей могут быть названы Эйлер, Ламберт, Брадлей, Боскович, Лагранж.

Предметом отдельного мемуара [15] являются наблюдения Бугера над расширением и сжатием металлов; наблюдениям способствовали резкие перепады температуры в Кордильерах.

Бугер возвращается во Францию в июне 1744 г. и делает 14 ноября 1744 г. на открытом собрании Академии доклад, опубликованный впоследствии в мемуарах Академии, о результатах измерений в Перу. Экспедиционные работы служат также предметом его докладов в 1745 г.

Большой труд Бугера „Фигура Земли, определенная наблюдениями г. г. де-ла-Кондамина и Бугера“ выходит в 1749 г. [22]. Он посвящен описанию „многотрудных наблюдений астрономических и измерений геометрических“, как говорит М. В. Ломоносов, поминая этот труд в своем бессмертном сочинении „Первые основания металлургии или рудных дел“.*

Приложением к книге Бугера является „Краткое повествование о путешествии в Перу, содержащее описание стран, в которых проводились наблюдения“. Оно включает следующие разделы: описание части Перу между океаном и большой цепью гор, именуемой Кордильерами; описание Перуанских Кордильер и ограничиваемой ими местности в окрестностях Квито; заметки или отдельные наблюдения над природой почвы, землетрясениями, вулканами и т. д.; возвращение автора из Квито до Северного (Атлантического) океана рекою Магдалена; наблюдения над магнитом; обитатели Перу и их нравы.

* М. В. Ломоносов, Сочинения, т. VII. Изд. Академии Наук СССР, 1934.

Отчеты Бугера о путешествии были интересны, но еще увлекательнее докладывал и писал о своих странствованиях де-ла-Кондамин, второй из руководителей Перуанской экспедиции.

Когда были закончены измерения, де-ла-Кондамин совершил весьма смелое по тем временам путешествие от Перуанского побережья Тихого океана до Гвианского побережья Атлантического океана, спустившись по Амазонке от ее верховий до устья, то есть проделав по реке путь свыше 4500 км. Это первое в истории научное путешествие по Амазонке. Де-ла-Кондамин описал его в сразу изданной им по возвращении в Париж книге.*

Шарль-Мари де-ла-Кондамин — колоритная фигура. Его семья и он сам принадлежали к аристократической знати Парижа. Жизнь ему давалось легко, успех неизменно ему сопутствовал, будь то на светском, военном или ученом поприще. Он имел доступ к всесильным министрам, был членом Академий наук в Париже и Берлине, почетным членом Российской Академии Наук (избран в 1754 г.), другом Вольтера, состоял в переписке с М. В. Ломоносовым и русским академиком астрономом А. Н. Гришовым (1726—1760 гг.). Будучи астрономом, он в то же время занимался и весьма далекими от астрономии вопросами, как то: русской грамматикой, медициной и т. п. Он был неутомимым путешественником, умеющим интересно рассказать и описать свои наблюдения над горами и реками, фауной и флорой, людьми и их обычаями.

Де-ла-Кондамин не был все же столь крупным ученым, как Бугер. Известный физик Био, автор биографий Бугера и де-ла-Кондамина, так характеризует роль обоих в Перуанской экспедиции. Все, что касается создания приборов, выбора способов измерений, размещения приборов, подготовки и проведения точных измерений, должно быть приписано

---

* De la C o n d a m i n e. Relation abrégée d'un voyage fait dans l'intérieur de l'Amérique méridionale. Paris, 1745.

Бугеру. Однако для обеспечения возможности измерений нужно было преодолевать препятствия, чинимые местными властями, завоевывать симпатии жителей, относившихся с суеверной враждой к чужеземцам, надо было заставить себя уважать, преодолеть храбростью недоброжелательство, что блестяще и делал де-ла-Кондамин. В свободное от этих занятий время де-ла-Кондамин наравне с другими и не менее умело, чем они, участвовал в астрономических наблюдениях.

Франция и весь ученый мир восторженно встретили вернувшихся из путешествия Бугера и де-ла-Кондамина. Вольтер приветствовал их возвращение стихами, в которых воспевал героев физики, аргонавтов наших дней, которые переправились через горы, пересекли океан, громадный труд и точные измерения которых установили форму „изумленной земли".

Путешествие в Перу, принесшее Бугеру заслуженную славу, вместе с тем стало и причиной его наибольших огорчений, столь серьезных, что, по мнению некоторых биографов, они укоротили его жизнь. Радость успешного завершения важного, тяжелого и опасного труда, потребовавшего девять лет жизни, была омрачена для Бугера тем, что оба руководителя Перуанской экспедиции, он и де-ла-Кондамин, привезли в Париж не только результаты совместных измерений, но и зародыши взаимной неприязни, начавшейся с распрей в годы экспедиции и сохранившейся в дальнейшем.* Об этом свидетельствует, например, одно из писем Бугера Леонарду Эйлеру, хранящихся, как установил автор настоящей статьи, в Архиве Академии Наук СССР. В письме, датированном 11 июля 1754 г., то есть написанном спустя десять лет после возвращения из экспедиции, Бугер с горечью отмечает, что нельзя питать иллюзий о его взаимоотношениях с г-ном де-ла-Кондамином, что последний систематически искажает истину. Горькие жалобы на де-ла-Кондамина содер-

* T. Young. Life of de la Condamine (Biographiès of men of science).

жатся также в письмах Бугера другому его знаменитому другу — Даниилу Бернулли.

Бо́льшая доля похвал за результаты экспедиции доставалась де-ла-Кондамину, и Бугер воспринимал эту несправедливость как результат того, что тот хочет присвоить себе его заслуги. Бугер нападал на де-ла-Кондамина, последний защищался и подвергал Бугера насмешкам; пререкания вылились в устные и письменные диспуты, приводившие Бугера в отчаяние и сильно отравившие последний, парижский период его жизни.

Путешествие, потребовавшее переходов через океан, еще больше усилило неизменный интерес Бугера к мореходному искусству, в результате чего в 1746 г. выходит труд Бугера „Трактат о корабле, его построении и его движении“ [18]. Над этим большим сочинением, объемом свыше 700 страниц большого формата, Бугер, как он отмечает в предисловии, работал в годы экспедиции в Перу, используя для этого все остававшееся свободным время.

Интересовался теорией корабля и друг Бугера — Леонард Эйлер (1707—1783), который в 1730 г. даже предполагал перейти лейтенантом в русский флот. На три года позже „Traité du Navire“ Бугера выходит в 1749 г. посвященная тому же вопросу „Scientia Navalis“ Эйлера. Бугер очень высоко оценил последнюю книгу, о чем свидетельствует датированное 20 марта 1751 г. письмо Бугера Леонарду Эйлеру.

Бугера следует считать одним из основоположников теории корабля. Вот что писал по этому поводу акад. А. Н. Крылов:

„В 1746 г. появилось в Париже сочинение Бугера «Traité du Navire», а в 1749 г. вышло в Петербурге присланное Эйлером из Берлина за несколько лет перед тем сочинение «Scientia Navalis» в двух громадных томах in 4°. Оба сочинения, написанные одновременно, одно в Перу, другое в Берлине, оказались по методу изучения вопросов и по результатам весьма близкими между собой. В них вполне устанавливается в применении именно к кораблю учение

о пловучести, остойчивости и ее измерении, вводится понятие о метацентре, развивается данное еще Ньютоном учение о сопротивлении жидкостей в применении к кораблю и к действию ветра на паруса и решается целый ряд других вопросов, относящихся к кораблю и его мореходным качествам.

„Сочинения Эйлера и Бугера показали, что исследования по теории корабля доставляют обширный материал для приложения математики и новых ее методов, которые тогда разрабатывались.

„... С 1753 г. Парижская Академия наук предлагает на конкурс целый ряд тем по теории корабля. В нем принимают участие Эйлер, братья Бернулли, Бугер, аббат Боссю и другие математики того времени. Ими вырабатываются приемы вычисления по чертежу элементов корабля и его остойчивости, указывается способ практического определения положения центра тяжести...“.*

Отметим, в качестве примера, что слово „метацентр“, понятие о котором играет столь существенную роль в теории корабля, введено в науку Бугером.

В 1747 г. Бугер публикует описание новой конструкции глубоководного лага — прибора для измерения скорости хода корабля и пройденного им пути [19]. Употребляя обыкновенный и глубоководный лаги одновременно, можно было, не останавливая движения корабля, определять его скорость относительно неподвижной воды на большой глубине. Следует отметить, что на том же принципе, но другого устройства глубоководный лаг был придуман великим современником Бугера М. В. Ломоносовым.

Акад. М. А. Рыкачев (1840—1919) сопоставляет лаги Бугера и Ломоносова, разбирая речь Ломоносова „Рассуждение о большой точности морского пути“.**

* Акад. А. Н. Крылов, Собрание трудов, том IX. Теория корабля. Часть первая. Изд. Академии Наук СССР, 1948 г.

** М. В. Ломоносов, Сочинения, т. V. Изд. Академии Наук СССР. 1902.

В 1748 г. Бугер дает описание изобретенного им гелиометра — зрительной трубы с двумя объективами для измерения малых углов на небесной сфере, например угловых диаметров планет [20]. Гелиометром, как показывает и самое его наименование, можно было измерять и угловой диаметр солнца.

Лаланд в письме Леонарду Эйлеру от 27 июня 1755 г. называет Бугера первым изобретателем этого инструмента, имевшего существенное значение в развитии астрономии. Ряд указаний о гелиометре Бугера можно найти также в письмах Леонарду Эйлеру от академика А. Н. Гришова. Вспомним, что именно при помощи гелиометра Бессель пытался впервые определить расстояние от неподвижной звезды до земли.

Перейдем к описанию последних лет жизни Бугера. Для изучения этого периода его деятельности весьма полезными смогут оказаться заслуживающие в дальнейшем издания письма Пьера Бугера Леонарду Эйлеру, хранящиеся в Эйлеровском наследии Архива Академии Наук СССР.* Эти письма относятся к периоду 1751—1756 гг., их общее число 17. В них затрагиваются разнообразные вопросы оптики, астрономии, геодезии и метеорологии (в частности рефракции, земного электричества). В Архиве хранится также копия письма Бугеру академика А. Н. Гришова. Имя Бугера часто упоминается в письмах к Эйлеру Гришова, Лаланда, де-ла-Кайля, Клеро. В одном из писем Клеро пишет: „Г-н Бугер — один из наиболее почитаемых мною геометров".

О внешнем облике Бугера в эти годы позволяет судить воспроизведенный в этой книге его портрет пастелью работы

* Подлинные письма Пьера Бугера Леонарду Эйлеру от 20 марта 1751 г., 30 мая 1751 г., 4 июня 1751 г., 9 октября 1751 г., 2 апреля 1752 г., 14 июля 1752 г., 23 ноября 1752 г., 8 февраля 1753 г., 3 марта 1753 г., 28 сентября 1753 г., 8 апреля 1754 г., 2 мая 1754 г., 11 июля 1754 г., 19 ноября 1754 г., 1 мая 1755 г., 27 сентября 1755 г., 18 мая 1756 г. — Архив Академии Наук СССР, Фонд 136, опись 2.

Перроно (1715—1783) — известного французского живописца, одного из лучших пастелистов XVIII в.

Портрет с надписью по каталогу „Пьер Бугер — гидрограф“ хранится в картинной галлерее Лувра. Он сделан в 1753 г., то есть когда Бугеру было 55 лет, за пять лет до его кончины. *

С 1751 г. по год кончины — 1758 г. — Бугер публикует ряд мемуаров по оптике, астрономии, механике, геодезии, навигации, свидетельствующих о разнообразии, а вместе с тем и о неизменности и целеустремленности его научных интересов.

Эти работы являются изложением докладов, которые он делал в Академии наук. Среди них мемуар „Замечания о способах измерения света с некоторыми применениями этих способов“ [34], работы по наблюдению параллакса Луны, по измерению длины градуса меридиана, по расширению воздуха, по штурманским выкладкам и управлению кораблем.

Один из мемуаров посвящен наблюдениям над длинным маятником [30]. Такие опыты в середине XVIII в. делались многими учеными, в том числе и М. В. Ломоносо-

---

* Приведем описание портрета. Бугер сидит в кресле, правая рука опущена в жилет, под левой треуголка. На нем отливающий разными оттенками светлолиловый кафтан и жилет того же цвета, но только более бледного. Отделкой одежды служат воротник из белого тонкого батиста с кружевным жабо и кружевные манжеты рукавов. На голове длинный напудренный парик. С лиловым костюмом контрастирует желто-зеленый фон. Выражение лица суровое, черты резкие, как бы вырубленные ударами топора, своевольная линия рта, глаза серо-коричневые, отчеркнутые синим, цвет лица желчный, — возможно, уже сказывалось заболевание печени, от которого Бугеру суждено было скончаться. (L. Vaillat et P. Ratouis de Limay. J. B. Perronneau, sa vie et son oeuvre. Paris, 1923).

Значительно более известна, чем портрет работы Перроно, сделанная с него гравюра в виде овального медальона в прямоугольной рамке. Гравюра была сделана в 1779 г. известным французским гравером и поэтом С. Мигe (1736—1820).

вым. Таблица его наблюдений приложена к „Рассуждению о точности морского пути“ и в примечаниях к V т. сочинений М. В. Ломоносова Н. А. Любимов пишет о мемуаре Бугера следующее. Большинство ученых считало, — говорит он, — что длинный маятник, будучи оставлен в покое (а не совершая колебания, подобно маятнику Фуко), изменяет несколько свое положение с течением времени, и его отклонения от положения равновесия обладают преимущественным направлением и что это явление, называвшееся reciprocatio penduli, связано с общей системой мира. Другие ученые это явление отрицали. Споры изложены подробно в истории Парижской Академии наук за 1742 г. В 1754 г. Бугер делал многие опыты над длинным маятником и показал, что изменения в положении вертикального маятника не подчиняются никакому правильному закону, зависят не от движения земли, а от второстепенных причин (свойств нити, внешних сотрясений, приводящих маятник в незаметные качания, и т. п.).

В 1757 г. выходит книга об изменении градуса меридиана между Парижем и Амьеном, написанная Бугером совместно с Кассини и другими авторами [35].

В 1753 г. издается его большой труд по морскому делу и книга „Новое сочинение по навигации, содержащее теорию и практику штурманского искусства“ [27]. История создания этого трактата следующая. Курс навигации королевского гидрографа Жана Бугера, отца Пьера Бугера, обладавший многими достоинствами и сослуживший большую пользу, будучи основным учебным руководством по мореплаванию, устарел, и оба его издания — 1698 и 1706 гг. — были к середине XVIII в. давно распроданы. Морской министр повелел Пьеру Бугеру издать новое руководство по навигации. Бугер первоначально предполагал переиздать книгу отца, значительно ее переработав и дополнив, но при обстоятельном рассмотрении вопроса счел необходимым написать книгу заново. Это было вызвано, по словам Бугера, прежде всего большим развитием и уста-

новлением взаимной связи наук, которые были не столь еще совершенны при жизни его отца.

Трактат состоит из пяти книг. В первой из них в популярной форме изложены необходимые мореплавателям сведения по геометрии. Вторая книга содержит основы штурманского искусства, в ней говорится о фигуре и величине земли, о пользовании морской картой и компасом. Третья включает полезные мореплавателям данные по астрономии, а в книге четвертой показывается их применение в навигации. Пятая и последняя книга посвящена различным способам решения навигационных задач.

Руководство Бугера вышло в последующих изданиях на французском языке: в 1761 г. в сокращенном и несколько переработанном де-ла-Кайлем виде и в 1792 г. с дополнениями астронома Лаланда.

Новое руководство Бугера, повидимому, нашло наибольший отклик в России, что является одним из свидетельств высокого уровня морского обучения в России XVIII в. Эта книга имела значение в подготовке русских военных моряков XVIII и начала XIX вв., из которых вышло много великих флотоводцев и морских путешественников.

Книга Бугера не просто была переведена на русский язык, но подвергалась переработке и выдержала много изданий. Переводчиком ее и редактором был Николай Гаврилович Курганов (1726—1796) — русский ученый, астроном, сподвижник М. В. Ломоносова, профессор высшей математики и навигации в Морском корпусе, автор широко известной в свое время книги „Письмовник". Напомним, что именно Курганов вместе с Красильниковым вели под руководством Ломоносова наблюдения за прохождением Венеры по диску солнца.

В „Уведомлении" Н. Г. Курганов дает следующую оценку труда Бугера:

„Сочинитель сея книги господин Бугер есть королевской Парижской Академии наук, Брестской морской академии

и королевского Лондонского ученого собрания член, бывший королевским гидрографом при портах Кроазике и Гавр де-Грасе, который многими около половины сего столетия изданными от себя наипаче к приращению всея мореходныя науки полезными книгами в свете славен...“.

В первом издании „Бугерово новое сочинение о навигации“ вышло в русском переводе в 1764 г.; титульный лист его воспроизведен в настоящей книге. Второе, исправленное издание вышло в 1785 г. под несколько видоизмененным названием: „Бугерово новое сочинение о навигации, содержащее теорию и практику штурманского искусства. Преложено с французского, и при сем выходе многое иное поправлено и пополнено Морского шляхетного кадетского корпуса математических и навигацких наук профессором Николаем Кургановым. В Санкт-Петербурге в типографии оного же корпуса вторым тиснением. 1785“.

В 1799 г. в Петербурге выходит третье издание сочинения Бугера, а в 1802 г. несколько сокращенное четвертое. Библиография русских переводов Бугера еще требует уточнения.

Несколько изданий выдерживает конспективное изложение труда Бугера. Приведем содержание титульного листа одного из изданий: „Определения вещам, содержащимся в новом Бугеровом сочинении о навигации с приложением некоторых нужных примечаний для употребления учащегося в морском шляхетном кадетском корпусе благородного юношества. В Санкт-Петербурге печатано вторым тиснением в типографии оного ж корпуса, 1775 года“.

В 1794 г. и впоследствии в 1801 г. издаются дополнения Н. Курганова к книге Бугера. Приведем текст заглавного листа издания 1794 г.: „Пополнения Бугеровой науки мореплавания. Часть первая, предлагающая таблицы склонения и прямого восхождения солнца, и многие иные астрономские, географские и физические познания, для употребления во флоте и в морских училищах. Издана от профессора

математических и навигацких наук и кавалера Н. Курганова. В типографии помянутого корпуса, 1794 г.".

В предисловии к „Новому сочинению по навигации" Бугер высказывает ряд замечательных по глубине суждений о связи между теорией и практикой, о преподавании. Приведем некоторые выдержки в переводе Н. Г. Курганова:

„Практика подобна руке, тогда действующей, когда теория вместо ума оною разумно управляет".

„Теория должна завсегда объяснять практику, а, напротив того, практика ничего не должна заимствовать от теории, чего бы в свою пользу употребить не могла".

Отметим, что Бугер никогда не включал в свои сочинения ничего, что могло бы служить возвеличению автора, свидетельствуя об его учености, без прямой пользы читателю. Так и из сочинения по навигации Бугер тщательно исключил все, кроме необходимых прямых указаний штурманам, вытекавших из его широких и глубоких знаний и большого опыта.

За год до кончины Бугера, в 1757 г., появляется в свет его трактат об управлении кораблем [33]. В этом сочинении Бугер проводит вначале параллель между прошлым и современным ему состоянием мореходного дела, излагает необходимые для последующего рассмотрения принципы механики, обстоятельно применяет их к вопросам управления парусным кораблем.

Последние два года жизни Бугер почти целиком посвятил подготовке трактата об оптике, которому суждено было стать его лебединой песней.

Работа над перечисленными трудами, деятельность в Академии и в „Journal des Savants" в издании которого он участвовал с 1752 г., поглощали все время Бугера после его возвращения во Францию.

Его день в основном занимал крайне напряженный и весьма систематический кабинетный труд, редким отдыхом от которого служили прогулки и беседы с друзьями. Самые

тесные узы дружбы и общих интересов связывали его с братом, и горе, испытанное им в последний год жизни из-за смерти брата, еще ухудшило его здоровье, подорванное чрезмерно напряженным трудом. Весною 1758 г. выявилось заболевание печени, болезнь прогрессировала, и все меньше надежд оставалось на ее преодоление. В июне Бугер уже был вынужден не посещать Академию, не покидать комнату. Хотя он и упал духом, но все же работал и вносил последние поправки в трактат о градации света.

В августе Бугер, несмотря на крайнее истощение, собрал оставшиеся силы, чтобы сесть в карету и отвезти своему издателю только что законченную перепиской набело рукопись. Он советовал последнему ускорить издание, если тот не хочет, чтоб труд был издан посмертно. Однако Бугеру не суждено было его увидеть. Через несколько дней после поездки, 15 августа 1758 г., он скончался в возрасте 60 лет и 6 месяцев. Его кончине была посвещена, насколько известно, книжка доминиканца Лабертония под наименованием „Повествование об обращении и смерти г-на Б.*

В лице скончавшегося ранее брата Бугер потерял единственного близкого наследника, и приобретенное им скромное состояние он завещал друзьям и слугам, оставив значительную часть в пользу бедных.

Заботу об издании трактата об оптике Бугер доверил своему другу академику де-ла-Кайлю (1713—1762) — автору многочисленных работ по астрономии и геодезии, курса оптики, выдержавшего много изданий на французском и латинском языках. Как раз в это время (16 сентября 1756 г.) он был избран почетным членом Российской Академии Наук.

Смерть не позволила Бугеру полностью завершить подготовку рукописи трактата к печати. Он не успел написать

---

* P. Laberthonie. La Relation de la conversion et de la mort de M. B. Paris, 1784. (Перепечатано также в Le Supplement aux oeuvres du P. la Berthonie. Paris, 1811).

предисловие, оставил вместо некоторых чисел пробелы, надеясь на возможность провести летом 1759 г. дополнительные, более точные опыты и тогда вписать новые данные.

Смерть постигла Бугера во время каникул Академии; де-ла-Кайля в Париже не было. Бумаги, в том числе листы подлинника, а также приборы Бугера были проданы или растеряны. Остался дубликат рукописи, переписанный чужой рукой.

Де-ла-Кайль достойно выполнил возложенное на него Бугером дружеское поручение. „Оптический трактат о градации света“ появился в свет в 1760 г.

В 1762 г. Иоахим Рихтенбург перевел трактат Бугера на латинский язык, не исправив ни одной из многочисленных опечаток французского издания [36].

Для характеристики содержания и значения оптического трактата Бугера необходимо привести данные об истоках фотометрии.

II. Фотометрия до Бугера

Возникновение общих представлений о направлении и количестве света не требовало предшествующего развития науки, их делала ощутимыми повседневная жизнь. Понятие о луче зрения имеет, вероятно, не меньшую давность, чем геометрическое понятие о прямой. На заре человечества следует также искать возникновения понятий „светлее“ и „темнее“ — о большем и меньшем количестве света. Однако научное развитие понятий о направлении и количестве света шло далеко не параллельно.

Представление о луче света как о направлении послужило отправной точкой для развития геометрической оптики. Изменение направления лучей при их отражении и преломлении изучалось тысячелетия назад, как об этом свидетельствуют трактаты по оптике Евклида, Птоломея — памятники оптической культуры античного мира. После трудов Галилея, Кеп-

лера, Декарта, Ферма в первой половине XVII в., Ньютона и Гюйгенса во второй его половине, геометрическая оптика уже к началу XVIII в. основывалась на подлинном научном знании и являлась хорошо разработанной, даже во многих второстепенных деталях, научной дисциплиной.

Представление о луче света как о носителе энергии, оценка его по большей или меньшей силе воздействия на глаз послужили основой для развития другой главы оптики — фотометрии.

Фотометрия как совокупность научных знаний о количестве света возникла значительно позже геометрической оптики.

Относительный уровень знаний по фотометрии к началу XVIII в. был примерно таким же, как по геометрической оптике за два тысячелетия до этого. Такое положение определялось в значительной мере общими путями развития науки. Геометрическая оптика в большей мере дитя математики, чем физики, а фотометрия, наравне с другими главами физической оптики, начала развиваться лишь тогда, когда метод научного эксперимента стал оружием исследователя.

Были различны и запросы человеческой практики к развитию геометрической оптики и фотометрии. Если углубление знаний об отражении и преломлении света было прямо необходимо для построения оптических инструментов, то в то же время техника освещения не предъявляла до конца XVIII в. никаких требований к развитию фотометрии.

Источники света в течение тысячелетий почти не совершенствовались, человечество вынуждено было удовлетворяться лучинами, факелами, масляными плошками и, впоследствии, свечами.

В начале XVII в. уже использовались телескопы и микроскопы; улицы городов в это время никак не освещались и, выходя вечером из дома, человек вооружался факелом. Ламповое стекло, обеспечивающее тягу в источниках с пламенем, было изобретено после того, как уже изготовлялись ахрома-

тические объективы для телескопов. Достаточно вспомнить, что керосиновые лампы появились лишь во второй половине XIX в., опередив не больше, чем на одно-два десятилетия рожденные русскими изобретателями электрические источники света.

Светотехника много моложе оптотехники, и в значительной мере потому и фотометрия стала развиваться значительно позже геометрической оптики.

Приведем краткий очерк истории фотометрии, стараясь при этом указывать на такие примеры, которые полезны для понимания творчества Бугера.

Фотометрия родилась в недрах астрономии. Уже Гиппарх (II век до н. э.), составляя первый звездный каталог, разделил звезды по их видимому блеску, по звездной величине. Изучение ближайших небесных тел, планет и их спутников, прежде всего Луны, требовало понимания законов их освещения и отражения ими света, то есть установления кардинальных фотометрических соотношений. Астрофотометрия и, главным образом, фотометрия планет и явились основными побудителями к накоплению первоначальных фотометрических знаний.

Вспомним, например, замечательные суждения об отражении света луною *Галилео Галилея* (1564—1642), оптические работы которого, как известно, заслуживают самого внимательного изучения.* Приведем некоторые выдержки из „Диалога".** Обратимся непосредственно к спору между Симпличио и Сальвиати об отражении света Луною. Этот ученый спор излагается на страницах раздела „День первый". Симпличио считает Луну „гладкой и вылощенной, как зеркало" и утверждает, что „возвышенности и углубления на Луне — иллюзии, вызван-

* Акад. С. И. Вавилов. Галилей в истории оптики. Сборник „Галилео Галилей". Изд. Академии Наук СССР, 1943.

** Галилео Галилей. Диалог о двух главнейших системах мира — птоломеевой и коперниковой. Техн.-теор. изд., 1948.

ные прозрачностью и непрозрачностью". Сальвиати, устами которого говорит Галилей, доказывает, что поверхность Луны не является зеркальной, а шероховатой. Он считает, что шероховатая поверхность „образована из бесчисленного количества очень маленьких поверхностей, расположенных с бесконечным разнообразием наклонов, причем неизбежно случается так, что многие из них посылают отражающиеся лучи в одно место, а другие — в другое; словом, нет такого места, куда не достигало бы множество лучей, отраженных от множества крохотных поверхностей, рассеянных по всей поверхности шероховатого тела, на которое падают светоносные лучи... поэтому и Луна, так как поверхность ее шероховата и негладка, отсылает свет Солнца во все стороны". Отметим здесь же, что это представление о сущности отражения света шероховатыми поверхностями было положено в дальнейшем Бугером в основу его теории.

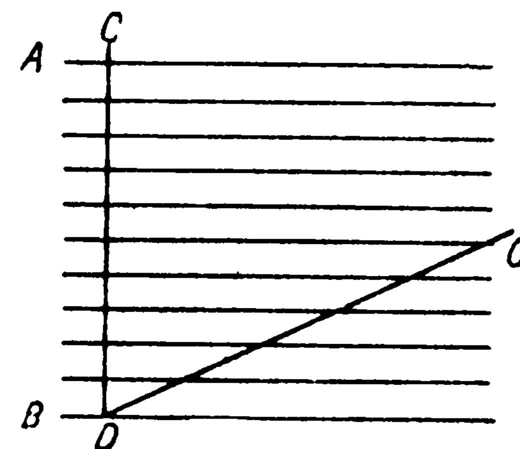


Рис. 1.

Особого внимания заслуживает высказывание Сальвиати о распределении яркости по диску Луны (рис. 1).

„Представьте себе, что все параллельные линии, исходящие из точек A и B, являются лучами, которые до линии CD доходят под прямыми углами; наклоните теперь эту же самую линию CD так, чтобы она нагнулась, как DO: разве вы не видите, что значительная часть тех лучей, которые ранее падали на CD, проходят, не касаясь DO? Значит, если DO освещена меньшим количеством лучей, то вполне понятно, что воспринимаемый ею свет слабее. Вернемся теперь к Луне. Раз она сферической формы, то если бы поверхность ее была так же гладка, как и у этой бумаги, то те части ее полусферы, освещенной солнцем, которые находятся около краев, получили бы гораздо меньше света, чем средние части, так как на первые лучи падают очень косо, а на вторые — под прямым углами. Поэтому в полнолуние, когда мы видим

почти всю полусферу освещенной, части около середины должны были бы казаться нам более блестящими, чем другие, находящиеся около окружности, а этого не наблюдается. Вообразите себе теперь лик Луны усеянным очень высокими горами; разве вы не видите, как их склоны и скаты, возвышаясь на выпуклости совершенной сферической поверхности, оказываются обращенными к Солнцу и способными воспринимать лучи гораздо менее косо, а потому казаться освещенными так же, как и остальные?..“.

Следует отметить, что это толкование Галилея в общем соответствует и современным теориям и современным экспериментальным данным.

Интерес к вопросу об отражении света Луною возник уже в Средние века, и приведенный спор Симпличио и Сальвиати заставляет вспомнить о беседе поэта и Беатриче в „Божественной комедии“ *Данте Алигьери* (1265—1321), величайшем творении поэзии и науки средневековья. Обратимся ко второй песне „Рая“ — заключительной части „Божественной комедии“. Данте, смотря в обращенные к высоте глаза Беатриче (откровения), возносится от неба к небу. Данте вопрошает о причине светлых и темных пятен на поверхности Луны и объясняет их, так же как Симпличио в „Диалоге“, разной степенью плотности (скважности) отдельных частей Луны. Беатриче, не соглашаясь с ним, говорит:

Коль скоро эта скважность не сквозная,
То есть предел, откуда вглубь лежит
Ее противность, дальше не пуская.

Отсюда чуждый луч назад бежит,
Как цвет, отосланный обратно в око
Стеклом, когда за ним свинец укрыт.

Ты скажешь мне, что луч, войдя глубоко,
Здесь кажется темнее, чем вокруг,
Затем, что отразился издалека.

Чтоб этот довод рухнул также вдруг,
Тебе бы опыт сделать не мешало,
Ведь он для вас — источник всех наук.

Возьми три зеркала, и два сначала
Равно отставь, а третье вдаль попять,
Чтобы твой взгляд оно меж них встречало.

К ним обратясь, свет за спиной приладь,
Чтоб он все три зажег, как строй светилен,
И ото всех шел на тебя опять.

Хоть по количеству не столь обилен
Далекий блеск, он яркостью своей
Другим, как ты увидишь, равносилен.*

Эти строки поэмы заслуживают, в рамках настоящей статьи, особого внимания не только потому, что в них воспевается опыт как „источник всех наук", но и потому, что примером служит опытное доказательство независимости яркости зеркального изображения от расстояния до предмета и наблюдателя.

Данте был предвозвестником эпохи Возрождения, из деятелей которой, вспоминая историю фотометрии, мы должны прежде всего обратиться к предшественнику Галилея *Леонардо да Винчи* (1452—1519). Леонардо старался осознать количественные соотношения, определяющие распределение света и тени. В „Книге о живописи мастера Леонардо да Винчи, живописца и скульптора флорентинского" мы читаем: „Здесь возразит противник, что он не хочет всей этой науки, что с него хватит практики срисованных природных вещей. На что следует ответ, что ничто нас так не обманывает, как доверие к нашему суждению без всякого иного основания, как это всегда доказывает опыт".**

---

* Данте Алигьери. Божественная комедия. Рай. Перевод и примечания М. Лозинского. ОГИЗ, 1945.

** Книга о живописи мастера Леонардо да Винчи, живописца и скульптора флорентинского. ОГИЗ—ИЗОГИЗ, 1934.

В „Книге о живописи“ современный читатель находит не только изумительные и сокровенные высказывания по искусству, но и много интересного об условиях природного освещения, распределении света, зрительном восприятии ландшафта и освещенных тел. Наблюдательность и прозорливость гениального художника и ученого позволили Леонардо да Винчи формулировать много таких положений, которые и поныне вызывают живой интерес не только художника, но и физика.

Тщательно разработанная Леонардо геометрическая наука о тенях и полутенях приводит его к суждениям о количестве света и его распределении. Однако основные законы фотометрии им не формулируются. Леонардо отмечает в общем виде, что степень освещения убывает по мере увеличения наклона падающего пучка. Нельзя признать точным и его утверждение, что „между самой близкой и самой удаленной частями будет то же отношение в степени их освещенности, что и в степени их отдаленности от тела, их освещающего“.

Здесь уместно привести следующие слова академика С. И. Вавилова:

„Следует вообще подчеркнуть особенность научного гения Леонардо. Он был изумительным наблюдателем по точности, вниманию и умению заметить существенное, мастером количественного эксперимента, но лишен дара абстракции, необходимой теоретику. Абстракция заменялась конкретным художественным восприятием; вместо обобщений и отвлеченности у Леонардо господствует аналогия и метафора. Поэтому наиболее ценное в его научном наследстве — это наблюдения и опыт. Его заметки по атмосферной и физиологической оптике до сих пор представляют немалый непосредственный, а не только исторический интерес. С другой стороны, Леонардо — бесспорный зачинатель фотометрии как точной измерительной науки. Его рисунки и пояснения к ним... не оставляют никакого сомнения в том, что Леонардо экспе-

риментировал с фотометрической установкой типа Румфорда".*

В манускриптах Леонардо имеется ряд набросков и записей, относящихся к сопоставлению источников света. Он брал свечи одинаковой или разной силы света и устанавливал между ними дощечку, отбрасывавшую их тени. Приведем в вольном переводе некоторые примеры записей Леонардо:

„Если установить на равном расстоянии между двумя свечами темное тело, то оно отбросит две противоположные тени, отличающиеся в той же мере по темноте друг от друга, в какой отличны создающие их источники света". Если источники света одинаковы, то „тени по степени темноты находятся в том же отношении, в каком находятся удаления источников света". „Однако, если большая свеча удалена от затемняющего тела, а малая свеча стоит близко от него, то, без сомнения, тени могут быть равной темноты или ясности".

В числе предвозвестников точного фотометрического знания следует назвать примечательного оптика XVI в., итальянского ученого, грека по происхождению *Франческо Мавролико* (1494—1575). Имеется несколько изданий его трактата с причудливым названием „Свет о свете" („Photismi de Lumine"), впервые опубликованного в 1575 г.** Это строгий труд ученого, написанный в соответствии с установившимися еще со времени Евклида формами изложения математических дисциплин. Каждая глава начинается определениями, за которыми следуют постулаты. Содержание строится как последовательность теорем. Каждая теорема вначале формулируется, затем доказывается и, если это необходимо, снабжается следствиями и толкованиями.

Мавролико указывает, что световые лучи образуют пирамиду, вершина которой лежит в рассматриваемой точке све-

* Акад. С. И. Вавилов. Галилей в истории оптики. Сборник „Галилео Галилей". Изд. Академии Наук СССР, 1943.

** Английский перевод: „The Photismi de Lumine of Maurolycus. A Chapter in Late Medieval Optics". New York, 1940.

тящего тела и которая имеет основанием освещаемое тело. Мавролико постулирует также, что интенсивность освещения определяется плотностью лучей. Однако он не приходит еще из этих двух положений к выводу о том, что освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния. Правильные положения чередуются у него с ошибками. Приведем в качестве иллюстрации формулировку одной из фотометрических теорем Мавролико:

„Теорема VII Точечный источник света, помещенный либо в центре, либо в любой точке окружности круга, будет освещать различные части этой окружности с равной интенсивностью“.

В трактате Мавролико мы находим зачатки науки о фотометрическом расчете, через двести лет после него глубоко развитой и тщательно разработанной Ламбертом.

Существенное фотометрическое соотношение было сформулировано в 1604 г. *Иоганном Кеплером* (1571—1630). В первой главе сочинения „Ad Vitellonem Paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur“ мы находим следующее утверждение: „Силы света расходящихся лучей убывают в обратных отношениях к воспринимающим плоскостям“.

Подробные суждения о свете и тени, могущие быть отнесенными к фотометрической науке, содержатся в изданном в 1613 г. в Антверпене и иллюстрированном Рубенсом трактате об оптике Франсуа д'Эгийона или, иначе говоря, *Францискуса Агвилониуса* (1566—1617).* Агвилониус родился в Брюсселе, скончался в Антверпене, где был профессором. Повидимому, Агвилониус был человеком большой учености, но не был крупным мастером науки; его трактат еще ждет своего исследователя. Книга Агвилониуса особо привлекает к себе внимание тем, что шесть заставок к отдельным главам трактата представляют посвященные опти-

* Francisci Agvilonii. Opticorum Libri Sex. Antverpiae, 1613.

ческим сюжетам изумительные гравюры резцом на меди. Они принадлежат, как это теперь с несомненностью установлено, великому фламандскому живописцу и граверу Питеру-Павлу Рубенсу (1577—1640).* Рисунки Рубенса отлично воспроизведены гравером Галле.

Мы приводим ниже фотографию с заставки к книге пятой „De luminoso et opaco“. Это первое из известных изображений фотометрической установки в подлинном смысле этого слова (не считая набросков Леонардо да Винчи). На гравюре изображен ученый, проводящий фотометрический опыт с двумя „ассистентами“-амурами. Они добиваются равенства освещенностей от двух разноудаленных светильников, более слабого с одним огнем и более сильного с двумя. Здесь изображены все существенные детали фотометрической установки. Один амур поддерживает экран, другой удаляет более сильный источник и тем достигает равенства яркостей обоих „фотометрических полей“. Рисунок достоин мастера, и Рубенса если и можно упрекнуть, наряду с Франциском Агвилонским, то лишь в том, что световое равновесие достигается тогда, когда два огня удалены на вдвое большее расстояние, чем один.

Некоторые суждения фотометрического характера были высказаны *Ренэ Декартом* (1596—1650).

Экспериментальные методы сравнения количеств света до появления работ Бугера весьма несовершенны. Остановимся, например, на фотометрии великого *Христиана Гюйгенса* (1629—1695). Обратимся к его трактату „Космотеорос“, посвященному вопросам строения вселенной и, в частности, солнечной системы; в нем излагается идея множественности обитаемых миров. Эта книга вышла в 1698 г., в год рождения Бугера. Отметим, что она имела в свое время существен-

---

* Е. Г. Лисенков. Иллюстрации Рубенса к книге Агвилониуса об оптике. Труды Госуд. Эрмитажа по истории западноевропейского искусства, том III, 1949.

ное значение для установления в России гелиоцентрического мировоззрения. Она была переведена на русский язык по прямому указанию и под непосредственным наблюдением Петра Первого.*

В „Космотеоросе“ описывается следующий астрофотометрический опыт. Желая узнать, во сколько раз свет от звезды Сириус слабее света Солнца, Гюйгенс наблюдает Солнце через трубу, закрытую экраном с весьма малым отверстием, и сопоставляет по зрительному воспоминанию свет от малого участка Солнца со светом Сириуса ночью.**

Способ Гюйгенса был подвергнут Бугером справедливой критике еще в первой его книге „Опыт о градации света“ [4], где он пишет:

„Г. Гюйгенс сильно ослаблял свет Солнца в желаемом отношении, наблюдая это светило через крайне малое отверстие, от которого он удалял в большей или меньшей мере свой глаз; но как можно после этого увериться, что этот свет был уравнен свету Сириуса, который появляется только ночью, и я не знаю, через сколько часов позже? То же самое будет происходить всегда: никогда не вспомнишь достаточно хорошо силу одного из светов, если ныне воспринимаешь другой, если только не располагать третьим, который можно использовать при одном и другом наблюдении“.

Еще более обстоятельные доводы против фотометрии Гюйгенса приводит Бугер в „Оптическом трактате“ [36], где он, в частности, отмечает различие в состоянии адаптации глаза при обоих наблюдениях.*** Справедливость требует отметить, что сам Бугер способов звездной фотометрии не предлагал.

---

* „Книга мирозрения или мнение о небесноземных глобусах и их украшениях Христиана Гюенса. Напечатана в Санкт-Петербургской типографии 1717 году, а в Московской 1724 году“.

** Подробное описание опыта Гюйгенса дано в Комментарии (примечание 29) в связи с критическими замечаниями Бугера.

*** Книга перьая, раздел первый, глава IX.

Уже после опубликования в 1729 г. „Опыта о градации света“ Бугера, а именно в 1735 г., *Цельзий* (1701—1744), знаменитый шведский астроном, автор носящей его имя температурной шкалы, предложил другой способ измерения света, также раскритикованный Бугером как в той же главе трактата [36], так и несколько раньше в докладе „О способах измерения света с некоторыми применениями этих способов“ [34], где он пишет:

„Некоторые ученые, вместо того чтобы наблюдать количество света или его интенсивность, полагали, что следует выбирать в качестве критерия бо́льшую или меньшую степень различения, с которой мы видим. В числе других г-н Цельзиус, именитый шведский астроном, который сопровождал наших академиков в путешествии к Полярному кругу, предложил этот второй способ вниманию Академии в 1735 г. Он выбирал маленький предмет, например некоторые рукописные шрифты, и, поднося их по очереди к двум светящим телам, удалялся больше или меньше до тех пор, пока не усматривал их равно отчетливыми, и утверждал, что для получения отношения интенсивностей двух источников света достаточно взять восьмые степени обоих расстояний (... упоминается лишь о четвертой степени, но это говоря о различных расстояниях от предмета до глаза и светящего тела, а отсюда должна следовать, согласно этому астроному, восьмая степень первых из этих расстояний для отношения сил самих светов). Предположим, что оказалось нужным поместить предмет в две раза ближе к глазу, когда он был освещен свечой, чем когда светильником; стало быть, утверждается, что первое их этих двух светящих тел посылает в двести пятьдесят шесть раз больше лучей, чем второе, так как 256 есть восьмая степень 2. Я не буду оспаривать, что это отношение иногда случайно имеет место, при некоторых расстояниях и для глаз вполне определенного строения. Действительно, все мы нуждаемся, чтобы хорошо видеть, в некотором количестве света, и это количество различно в зависимости от

большей или меньшей чувствительности сетчатки и большей или меньшей легкости, с которой наш зрачок расширяется и сужается. Также верно, что, приближаясь к предмету, мы получаем больше лучей и частично восполняем недостающий свет. Однако, если расположиться слишком близко или далеко, лучи, которые проникают через хрусталик, пересекутся до того, как достигнут дна глаза или, наоборот, пересекутся за ним; каждая точка предмета не будет, следовательно, изображена резкой точкой на сетчатке, изображение будет смутным, и отнюдь не существует интенсивности света, который мог бы возместить этот недостаток, поскольку он совершенно иного рода, чем порождаемый бо́льшим или меньшим количеством лучей. Г-н Цельзиус уверяет, что он нашел этим методом, что свет от солнца в триста тысяч раз сильнее, чем свет от полной луны при средних ее удалениях. Это полностью совпадает с тем, что было открыто мною; однако необходимо мне изъяснить, без вреда уважению памяти этого искусного астронома, что его одобрение, которое было бы столь высоко авторитетно во всяком другом случае, никак не обосновывает мое прежнее определение. Другой наблюдатель, глаза которого были бы иного строения, чем у шведского ученого, но который придерживался бы тех же принципов, пришел бы к совершенно иному закону, пользуясь иными расстояниями: вместо того, чтобы найти отношение восьмых степеней, он нашел бы отношение седьмых или шестых. Каким образом, однако, он знал бы, что это мнимое правило выполняется при сравнении светов, находящихся в совершенно иных отношениях, нежели те, на которых оно основано, или для которых оно проверено непосредственным опытом? Г-н Цельзиус проводил, повидимому, слишком грубые линии или довольствовался весьма неотчетливым видением, что воспрепятствовало ему заметить весьма существенные различия. Помимо того, полагая за верное стоящее под вопросом, он опрокинул естественный порядок такого рода исследований. Действительно, труднее подчинить опре-

деленному закону степень различения, с которой мы видим предметы, чем непосредственно измерять свет“.

После этой, пожалуй, чрезмерно суровой критики способа Цельзия Бугер в своей статье показывает, что предлагаемый им метод измерения количества света не имеет тех недостатков, которые свойственны приему, использованному Цельзием.

Способ, аналогичный способу Цельзия, использовал, в качестве вспомогательного, также и Бюффон в 1747 г. при измерении коэффициента отражения зеркал. Сидя перед зеркалом с книгой, он просил приближать свечу до тех пор, пока он мог четко различать буквы в книге, после чего свечу еще приближали до тех пор, пока становились вполне отчетливо различимыми буквы книги в ее отражении от зеркала. Первое расстояние оказалось равным 24 футам, второе — 15, из чего Бюффон заключил, что прямой свет относится к отраженному, как 576 к 225.

Весьма любопытный метод измерения света был предложен в 1700 г. *Франсуа Мари.** Его брошюра, сокращенный перевод которой, благодаря библиографическим изысканиям акад. С. И. Вавилова, удалось дать в виде приложения в настоящей книге, представляет интерес для истории оптики как первое из известных сочинений, специально посвященных измерению света. Способ Мари, наравне со способом Гюйгенса и Цельзия, был подвергнут критике Бугером в его трактате.

Ф. Мари является создателем фотометрического метода гашения, заключающегося в ослаблении измеряемого света в известное число раз до гашения, то есть до достижения порога зрительного восприятия, и в суждении о количестве света по тому, во сколько раз потребовалось его ослабить. Ф. Мари строил на этом принципе фотометрические приборы, которые он называл люциметрами.

---

* François Marie. Nouvelle découverte sur la lumière, pour la mesurer et compter les degrés. Paris, 1700, in 8°.

Бугер правильно порицает Мари за то, как он оценивал суммарное ослабление света при многократных последовательных его ослаблениях. Мари считал, что свет ослабляется в арифметической прогрессии, а не в геометрической, как это впоследствии было установлено Бугером. Мари, ослабляя свет поглощающими стеклами или толщей воды или повторным отражением от полированных поверхностей, ошибался в расчете, принимая, что ослабление света прямо пропорционально числу введенных поглощающих или отражающих пластин или пронизанной светом толще жидкости, которая его поглощает.

По поводу критики самого метода измерения, предложенного Мари, то есть метода гашения, можно сказать следующее. Бугер совершенно правильно полагал, что этот метод не мог служить той основой, на которой следовало строить науку о фотометрических измерениях. Метод Мари, как показало почти через двести пятьдесят лет дальнейшее развитие науки, оказался в руках искусных экспериментаторов отличным приемом для решения специальной задачи измерения предельно малых количеств света. Методом гашения широко пользовался акад. С. И. Вавилов и его ученики в их работах по зрительному установлению квантовой природы света и исследованию явлений люминесценции и новых видов излучения. Прием гашения света до порога восприятия был использован для выявления того замечательного обстоятельства, что чувствительность светоспринимающего аппарата глаза близка к предельно мыслимой; несколько доходящих до сетчатой оболочки квантов света достаточно для создания зрительного восприятия светового проблеска.*

Опыты Гюйгенса и Мари по измерению света лишь на несколько десятилетий предшествовали первым фотометри-

---

* С. И. Вавилов. Экспериментальные исследования световых квантовых флуктуаций визуальным методом. Успехи физических наук, т. 36. вып. 3, 1948.

ческим работам Бугера. Работа Цельзия была опубликована после них. Это свидетельствует о том, что до Бугера фотометрии как науки не было.

Чтобы охарактеризовать с точки зрения истории оптики эпоху деятельности Бугера, можно сказать, что в год кончины Ньютона (1727) Бугеру было двадцать девять лет, Леонарду Эйлеру двадцать, Ломоносову шестнадцать, а Ламберт еще не родился. Интересно и даже, пожалуй, не совсем понятно, что вопросы фотометрии никак не затрагивались Ньютоном. О фотометрии Эйлера и Ламберта речь будет итти ниже, в связи с работами Бугера.

Заслуживает особого упоминания, что вопросы фотометрии в некоторой мере интересовали и величайшего гения М. В. Ломоносова (1711—1765). В „Росписи сочинениям и другим трудам советника Ломоносова“ в числе прочих новых изобретений в области физических наук упоминается „светомерная труба для исследования расстояния и величины неподвижных звезд“.* На этот прибор и на то, что Ломоносов был первым русским фотометристом, обратил должное внимание акад. С. И. Вавилов.** Описания и чертежей Tubus Photometricus ad comparandum lumen astrorum constructus a ML, т. е. фотометрической трубы для сравнения света звезд, построенной Ломоносовым, не сохранилось. В лабораторном дневнике Ломоносова за 1762—1763 г. „Химические и оптические записки“ содержится следующая запись:

„... рассуждая свет ночной от одних звезд, заключить должно, что их диаметр не так мал, как думают. И так в камеру выбеленную впускать свет солнечный сквозь разные дырки на бумагу, чтоб от ней во всю камеру свет распростирался, и мерить свет, читая такую печатную книгу, кою

* Научное наследство, том I. Изд. Академии Наук СССР, 1948.

** С. И. Вавилов. Оптические работы и воззрения М. В. Ломоносова. Природа, 1936, № 12.

можно при одном сиянии звезд читать зимою. Апертуру разделить на число звезд видимых, число покажет диаметр звезд".

„NB. Вместо бумаги взять раздробленную мелко ртуть, поставить середи покоя, рефлексию лучей сделать на ртуть с другой стороны, чтобы повсюду свет рассыпался. Вместо литер употребить пункты или черты разной величины на бумаге, для того сделать раздвижную трубку. Высинить внутри так бело, чтоб с ясным небом издали не распознать".*

Как видно из этой записи, идея Ломоносова заключалась в том, чтобы оценивать свет звезд путем сопоставления со светом Солнца, прошедшим через малое отверстие, и световое равенство устанавливать не по памяти, как это делал Гюйгенс, а по критерию одинакового различения деталей.

III. Фотометрия Бугера

Оптический трактат, изданный в 1760 г., охватывает все то, что сделано Бугером в области фотометрии, начиная с первого исследования по этому вопросу в 1725 г. Поэтому обзор его содержания может дать полную характеристику фотометрии Бугера.

Трактат состоит из трех книг:

Книга первая. „Различные способы измерения света и некоторые приложения этих способов".

Книга вторая. „Исследования количества света, которое отражается поверхностями, как гладкими, так и шероховатыми".

Книга третья. „Изыскания о прозрачности и непрозрачности тел".

Первая книга трактата посвящена обоснованию фотометрических понятий и метода визуальной фотометрии, описанию приемов измерения, инструментов, а также результатов проведенных фотометрических опытов.

---

* М. В. Ломоносов, Сочинения, том VII. Изд. Академии Наук СССР, 1934.

Бугер устанавливает общие и частные понятия о количестве света и четко формулирует основной принцип визуальной фотометрии (принцип градации света), заключающийся в том, что сравнение двух количеств света проводится изменением одного из них в известное число раз до достижения светового равновесия для глаза с другим. В том случае, если сравниваемые количества света не могут быть сопоставлены непосредственно (как, например, свет солнца и луны), берется в качестве общей меры третий, вспомогательный, достаточно постоянный источник, со светом которого поочередно уравниваются сравниваемые количества света.

Изменение количества света в известное число раз достигается Бугером разными путями. В качестве исходного служит изменение числа расположенных рядом одинаковых источников света. Основным способом является изменение расстояния от источника света, при котором количество перехватываемого от удаленного источника света убывает, как квадрат расстояния до него. Весьма умело Бугером используются также для светового уравнивания линзы. При сравнении сильно разнящихся по силе света источников Бугер получает при помощи положительных линз промежуточные изображения этих источников (фиг. 2 трактата) и из сопоставления силы света этих изображений вычисляет отношение сил света самих источников. Отрицательные линзы служат для расширения пучка и уменьшения создаваемый им освещенности в известное число раз (как, например, при измерении освещенности от солнца). Для уравнивания света Бугер использует также способ изменения светящей площади, например отверстия в камере-обскуре, через которое поступает свет от неба.

Бугер вводит в обиход науки основной способ визуального фотометрирования, заключающийся в одновременном наблюдении двух соприкасающихся полей, одно из которых освещается светом от одного, а второе от другого из сравниваемых источников. Гравюра Рубенса с изображением ученого и амуров у фотометрической установки в книге об оптике Францискуса

Агвилониуса, о которой речь шла выше, отодвигает истоки принципа и способа светового уравнивания в предшествующее жизни Бугера столетие. Бугер подвергает справедливой и убедительной критике иные способы суждения о количестве света, предложенные его предшественниками и современниками — Гюйгенсом, Мари, Цельзием.

Бугер устанавливает линейность обычных фотометрических соотношений, сказывающуюся, например, в том, что отраженные или пропущенные телом потоки света пропорциональны падающему потоку. Он показывает, что зрительное восприятие различия в яркостях двух соприкасающихся полей определяется не разностью абсолютных значений, а отношением яркостей. Бугер усматривает величайшее психофизическое значение в этом факте, поскольку именно отношение яркостей остается неизменным при изменении уровня освещения. Бугер устанавливает, что яркостный контраст, когда он меньше определенного значения, которое Бугер оценивает около 1.5%, не выявляется глазом. Бугер пишет:

„Вообще, чувства нам даны не для того, чтобы в точности показывать, насколько различные причины наших ощущений сильнее друг друга; они премудро приуготовлены к тому, чтобы просто отмечать различия тех отношений, в которых эти причины с нами находятся. Сами причины могут отличаться весьма сильно, но если это различие едва ощутимо, оно еще не представляет для нас интереса, оно нам ничем не угрожает. В равной степени возможно, что чрезвычайно малое различие отвечает весьма различным ощущениям, ибо это небольшое увеличение воздействия бывает иногда в состоянии вызвать изменение наших конституционных свойств; а потому существенно, для нашего самосохранения, чтобы мы были об этом во-время предупреждены“.

Мысли о биологическом значении закона Вебера — Фехнера, который, пожалуй, можно было бы с неменьшим правом называть психофизиологическим законом Бугера, весьма поучительны.

Установление критерия контрастной чувствительности глаза позволяет Бугеру, в качестве примера, высказать совершенно правильное положение о том, что погруженный в воду объект перестает быть различимым на той глубине, когда отношение яркости доходящего от него света к яркости света, отражаемого поверхностью воды и рассеиваемого ее толщей, становится соответствующим порогу контрастной чувствительности. Количественную теорию этого вопроса Бугер дает в третьей книге трактата.

Бугер обстоятельно поясняет различие в понятиях об общем количестве света, испускаемом источником, и о его яркости как количестве света, исходящем с единицы площади. Бугер показывает, что зрительное восприятие определяется распределением освещенности по сетчатой оболочке глаза, что яркость не зависит от расстояния наблюдения, поскольку при изменении расстояния до протяженного светящего тела освещенность его изображения на дне глаза остается неизменной. Попутно Бугер выводит основные соотношения фотометрии оптического изображения.

Бугер подробно описывает ряд остроумных и глубоко продуманных лабораторных фотометрических установок для сравнения сил света источников, измерения коэффициентов пропускания прозрачных тел, коэффициентов отражения зеркал. Для сравнения яркостей в двух направлениях Бугер строит полевые переносные приборы, люциметры, являющиеся относительными фотометрами. Предложенные Бугером схемы и поныне представляют интерес для фотометрического приборостроения.

Второй раздел первой книги Бугер посвящает применению разработанных им способов измерения света к решению ряда задач оптики. Он определяет коэффициенты отражения света от металлических и стеклянных зеркал, измеряет пропускание света стопой стеклянных пластин, измеряет в лабораторных условиях прозрачность морской воды.

Совершенно правильно истолковывая свет неба как рассеянный атмосферой свет солнца, Бугер изучает яркость неба

или, иначе говоря, атмосферы в различных направлениях. Он сопоставляет освещенность от прямых лучей солнца с освещенностью от неба и между собою свет от различных квадрантов неба. К сожалению, числовые результаты этих измерений в трактате не проставлены.

Пожалуй наибольший интерес представляют произведенные Бугером фотометрические измерения небесных светил; этим измерениям посвящены последние главы первой книги трактата.

Бугер измеряет освещенность от полной луны при двух различных ее возвышениях над горизонтом, что позволяет ему оценить прозрачность атмосферы. Бугер измеряет освещенность от солнца и луны при одном и том же их возвышении над горизонтом. Источником света сравнения при этих, равно как и других, наблюдениях служат свечи — сальные и восковые.

Первая работа Бугера, изданная в 1726 г., выходит под наименованием „Сравнение силы света от Солнца, Луны и многих свечей“[1].

Результаты выполненных измерений были опубликованы Бугером также в „L'Essai d'Optique sur la gradation de la lumière“ и были использованы Леонардом Эйлером для расчета яркости солнца в его мемуаре „Рассуждения о различных степенях света Солнца и других небесных тел“.* Бугер показал, что если пучок солнечных лучей при возвышении Солнца 31° расширить отрицательной линзой в 108 раз, то есть уменьшить освещенность в $108^2 = 11\,664$ раз, то она уравновешивается освещенностью, создаваемой свечой на расстоянии 16 дюймов. Эйлер использует эти данные для сопоставления яркости солнца и яркости свечи. Приведем ход его расчета. Радиус солнца при средних до него расстояниях виден под углом

* Euler. Réflexions sur les divers degrés de lumiere du Soleil et des autres corps célestes. Histoire de l'Académie Royale des Sciences et Belles Lettres, Anneé MDCCL. Berlin, 1752.

16′7″=967″. Свечу Эйлер мысленно заменяет шаром радиусом $\frac{1}{4}$ дюйма, которой с расстояния в 16 дюймов виден под углом 51′=3060″. Отсюда следует, что отношение видимой яркости солнца к яркости свечи равно

$$11\,664\left(\frac{3060}{967}\right)^2=116\,860,$$

а поскольку лучи солнца прошли через атмосферу, потеряв при этом, по измерениям Бугера, одну треть света, то можно считать, что солнце в 175 000 раз ярче свечи. Упоминая еще о возможных потерях света в эфире, Эйлер говорит, что солнце в тысячи раз ярче самых ярких земных источников (расплавленных металлов). Этот замечательный расчет Эйлера был совершенно забыт.

Особый интерес представляет последняя глава первой книги, содержание которой ясно из ее наименования: „Наблюдения, сделанные с целью определить, насколько сильнее светят части солнца, близкие к его середине, сравнительно с теми, которые расположены у краев этого светила“.

Бугер проводит сравнительные измерения яркости солнечного диска в центре ближе к его краю и убеждается в падении яркости к периферии. Разные участки поверхности солнца светят к земному наблюдателю под разными углами: центральные — по нормали, крайние — скользящими лучами. Измерение распределения яркости по диску солнца позволяет поэтому, как показывает Бугер, непосредственно судить об изменении яркости с направлением излучения.

Результат своих измерений Бугер толкует следующим образом. Если бы сила света элемента поверхности излучающей сферы была по всем направлениям одинакова, то яркость возрастала бы обратно пропорционально косинусу угла, образуемого лучом с нормалью. При наблюдении излучающей сферы яркость должна была бы возрастать от центра к периферии, достигая на краю видимого диска бесконечно большого значения. Так как это явно не так, то данное предпо-

ложение следует сразу отбросить. Если бы сила света излучающего элемента изменялась пропорционально косинусу угла излучения, то яркость испускаемых по различным направлениям лучей была бы одинакова. Равномерно светящая сфера, испускающая свет по такому закону, казалась бы глазу диском одинаковой яркости. Это предположение ближе к истине, но и оно является лишь грубо приближенным, поскольку инструментальные наблюдения несомненно свидетельствуют о том, что в действительности яркость солнечного диска в центре больше, чем на краю. Следовательно, данные об изменении яркости с направлением излучения следует находить экспериментальным путем, а не устанавливать их умозрительно. Таков ход рассуждений Бугера.

Интересно противопоставить им те ошибочные воззрения, которых придерживались в данной области другие крупнейшие ученые — как современники Бугера, так и жившие после него.

Обратимся, например, к цитированному выше мемуару Леонарда Эйлера о степенях света солнца и других небесных светил. Исходным положением Эйлера, делающим результаты его основных, весьма интересных расчетов порочными, является постулат о независимости силы света элемента поверхности светящего тела от направления излучения. У Эйлера светит не тело, а совокупность светящих точек на его поверхности, сила света которой также не зависит от направления свечения, как масса не зависит от направления притяжения. Рассматривая в качестве источников светового действия геометрические точки на геометрической поверхности, Эйлер не мог притти к иному выводу. Здесь вспоминаются слова акад. С. И. Вавилова из его статьи о физической оптике Леонарда Эйлера: „Математическому гению Эйлера нехватало физической интуиции Ньютона и Гюйгенса".*

---

* Леонард Эйлер. Сборник к 150-летию со дня смерти. Изд. Академии Наук СССР, 1935.

Рядом с последними двумя именами вполне могло бы стоять и имя Бугера.

Исходя из своего постулата, Эйлер считает, что освещение определяется суммарной поверхностью видимых излучающих участков, независимо от их наклона. Поэтому Эйлер утверждает, что горы на луне, поскольку они увеличивают поверхность этого тела, также увеличивают интенсивность его свечения. Эйлер считает, что солнце светит не так, как равносветлый диск, видимый под тем же углом, а как плоский диск, равный по площади обращенной к нам полусфере солнца.

В 1760 г., через десять лет после статьи Эйлера и в год выхода оптического трактата Бугера, появляется знаменитое сочинение по фотометрии Ламберта. В этой книге, в убедительной и исключительно тактичной по отношению к уже знаменитому и на двадцать лет старшему Эйлеру форме, Ламберт опровергает его закон излучения. Ламберт, так же как и Бугер, в частности, отмечает, что из исходного постулата Эйлера вытекает, что самосветящий шар должен иметь возрастающую от центра к краям и у самого края даже бесконечную видимую яркость. Однако Ламберт сразу же впадает в ошибку сам, устанавливая как общий и строгий закон природы пропорциональность силы света косинусу угла излучения, или, иначе говоря, постоянство яркости по всем направлениям. Ламберт основывается на том, что „ведь никто не отважится сомневаться, что... вся поверхность солнца воспринимается равносветлой". Ламберт, используя представления теории излучения Ньютона, приводит и общее доказательство справедливости своего закона, казавшееся для своего времени убедительным. Так утверждается надолго „закон Ламберта", который, как теперь известно, справедлив лишь для абсолютно черного тела.

Если обратиться к высказываниям по вопросу о распределении яркости по диску солнца таких крупных ученых, как Лаплас и Гершель, живших на столетие позже Бугера, то остается лишь выразить изумление творческому дару Бугера.

Вторая книга трактата содержит „Исследования количества света, которое отражается поверхностями как гладкими, так и шероховатыми“. Первый и второй разделы посвящены фотометрическому изучению зеркального отражения света, а третий и четвертый разделы — теории отражения света шероховатыми поверхностями и применению этой теории к вопросам фотометрии планет.

В первом разделе рассматривается вопрос о том, как рассчитывать освещенность, создаваемую светом, падающим от источника света на непосредственно, а после отражения от идеальной зеркальной поверхности, или, как говорит Бугер, бесконечно гладкой поверхности, не гасящей ни одного луча. В предисловии к этому разделу Бугер пишет:

„Хотя речь будет итти о вещах чрезвычайно простых, мы считаем совершенно необходимым обратить на них внимание, ибо это устранит те, сами по себе незначительные, трудности, перед которыми, однако, остановились величайшие физики и математики, трактовавшие об оптике“.

Предмет изложения, однако, не столь прост, поскольку после отражения от искривленной зеркальной поверхности пучок света от точечного источника становится астигматическим. Для современного читателя трудность изучения этого раздела трактата усугубляется незнанием второстепенных деталей геометрической теории каустик, а эти вопросы хорошо были известны во времена Бугера. В современной теоретической оптике вопросы фотометрии астигматического пучка в значительной мере забыты.

В начале Бугер рассматривает отражение света от плоского зеркала и показывает, что освещенность, создаваемая отраженным пучком, обратно пропорциональна квадрату расстояния от изображения.

Далее Бугер переходит к рассмотрению отражения света искривленным зеркалом и на примере сферической зеркальной поверхности показывает, что падающий на элемент поверхности зеркала пучок лучей, исходящих от светящей точки, после

отражения перестает быть гомоцентрическим. Бугер особо отмечает трудность понимания механизма фиксации глазом астигматического изображения, иллюстрируя это случаем наблюдения предметов, погруженных под воду. Он приводит формулы, определяющие положение сагиттального и меридионального изображений от сферического зеркала; вывода он не дает, считая его читателю известным.

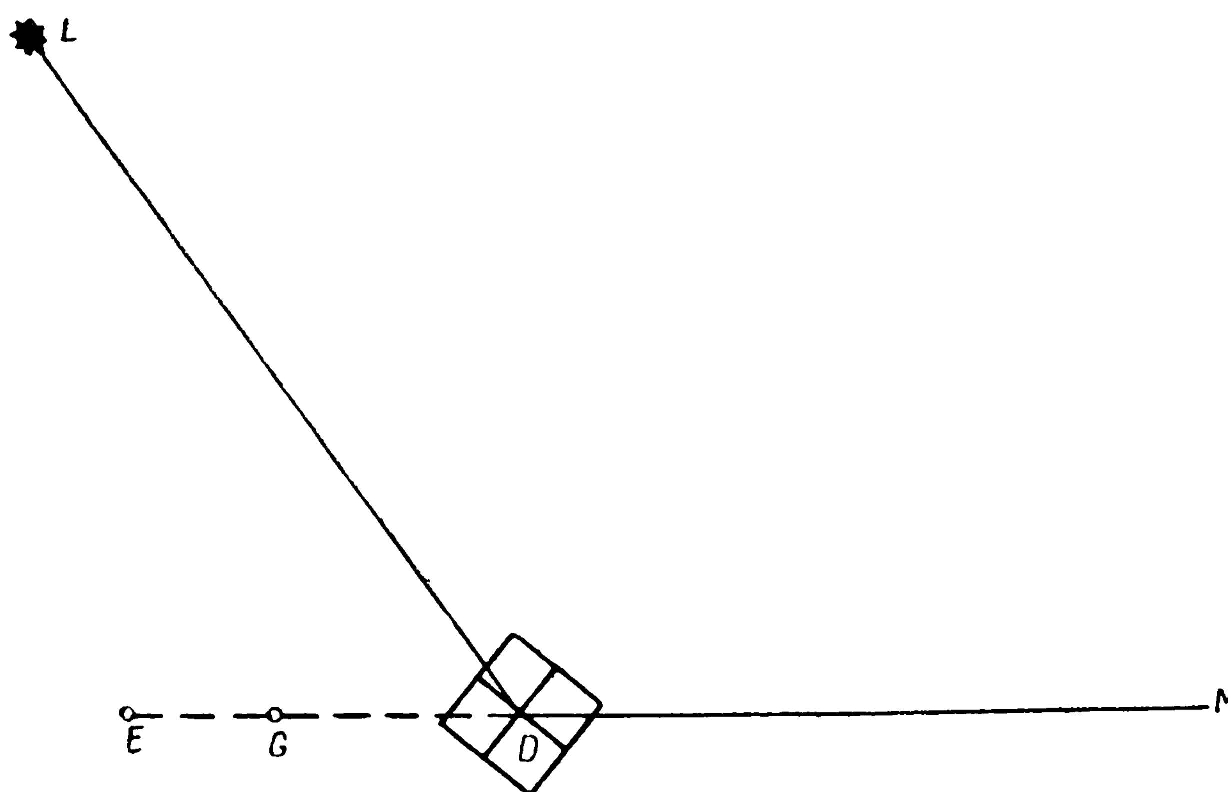


Рис. 2.

Бугер устанавливает, что если в гомоцентрическом пучке освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния от вершины пучка, то в астигматическом пучке она обратно пропорциональна произведению расстояний от меридионального и сагиттального фокусов. Это значительное и нужное положение мало популярно в современной фотометрии.

Сущность расчетов Бугера могла бы быть пересказана так. Свет от точечного источника L падает на точку D зеркала и отражается к точке M (см. рис. 2). Требуется рассчитать, какова будет освещенность в точке M, создаваемая перпендикулярно падающими лучами.

Пусть изображение точки L в меридиональных лучах есть E, а в сагиттальных G. Тогда освещенность отраженным светом в точке M равна:

$$\mathcal{E}' = \frac{I'}{ME \cdot MG},$$

где I' — сила света изображения, определяемая из соотношения:

$$\frac{I}{LD^2} = \frac{I'}{DE \cdot DG},$$

где I — сила света источника L.

Отсюда освещенность в точке M, создаваемая перпендикулярно падающими, отраженными от зеркала лучами, равна:

$$\mathcal{E}' = \frac{I}{LD^2} \frac{DE \cdot DG}{ME \cdot MG}.$$

Эту весьма полезную и общую формулу и получает Бугер.

Далее Бугер рассматривает вопрос о том, как светит зеркальная сфера, на которую падает свет от удаленного источника. Он устанавливает следующее соотношение. Сила света зеркальной сферы, полностью отражающей падающий на нее параллельный пучок света, по всем направлениям одинакова и равна

$$\frac{Er^2}{4},$$

где E — освещенность перпендикулярно падающими лучами в том пучке, который освещает сферу, а r — радиус этой сферы.

Далее Бугер подсчитывает силу света плоского диска и сферы, поверхность которых покрыта множеством маленьких зеркальных полусфер.

Соотношения, полученные Бугером в первом разделе второй книги, используются им в третьем и четвертом разделах той же книги, где изучается отражение света от матовых поверхностей.

Первый раздел второй книги завершается рассмотрением вопроса о том, как отражали бы нам свет планеты и Луна, если бы их можно было мыслить либо гладкими зеркальными

сферами, либо сферами, покрытыми множеством зеркальных полусфер. Первое предположение Бугер сразу отбрасывает, поскольку выводы из него противоречат наблюдениям. Второе предположение заслуживает, по мнению Бугера, рассмотрения и уточнения, поскольку модель такого типа соответствует наблюдаемым фактам, к числу которых Бугер относит отсутствие у планет, в отличие от Солнца, падения яркости от центра к краю диска. Бугер даже считает, что края планет и спутников более ярки, чем середина. Интересно попутное указание Бугера на его измерения яркости в разных точках Луны.

Второй раздел второй книги посвящен изысканиям о количестве света, отражаемого телами с полированными поверхностями. Бугер устанавливает, что при отражении часть света всегда оказывается как бы погашенной, поскольку лучи света всегда частично проникают внутрь тела, о чем можно судить по тому, что тело нагревается. „Было бы трудно понять, каким образом оно может приобрести эту теплоту, если только не считать, что некоторое число лучей отдаст ему часть своей силы... сообщая молекулам, из которых оно образовано, особого рода возбуждение".

Дальше Бугер вводит понятие о коэффициенте отражения. Он измеряет коэффициенты отражения света от поверхностей ртути, воды, стекла при различных углах падения. Бугер предлагает эмпирические формулы для зависимости коэффициента отражения от угла падения для случаев отражения света от поверхности воды и поверхности стекла. Прямые результаты измерений Бугера и значения, вычисленные по построенным на их основании эмпирическим формулам Бугера, соответствуют современным данным, в частности закономерности Френеля, если не считать ошибочного мнения Бугера о том, что при предельно скользящем падении света из воздуха или при падении изнутри под углом, бо́льшим угла полного внутреннего отражения, свет все же не полностью отражается. Другими заблуждениями Бугера, к которым его привела малая точность измерений, являются

предположения о том, что на поверхностях раздела часть света гасится и что при изменении направления луча на обратное коэффициент отражения изменяется.

Третий и четвертый разделы второй книги посвящены отражению света матовыми поверхностями. Бугер указывает, что превеликое число окружающих нас тел имеет шероховатые, не гладкие поверхности, отличающиеся от обработанных полированных поверхностей твердых тел или поверхностей жидкостей тем, что они отражают свет по всем направлениям. Бугер изучает для ряда отражающих поверхностей пространственное распределение яркости (индикатриссы яркости) и тем самым открывает ту главу фотометрии, которую теперь иногда называют гониофотометрией. Он строит первую теорию рассматриваемого явления, не потерявшую полностью своего значения и поныне, и применяет ее к решению астрофотометрических задач.

Перед тем как перейти к изложению сущности предпосылок и выводов Бугера, хочется дать общую оценку значения поднятого им вопроса об отражении света матовыми поверхностями. Если Бугера к изучению соответствующих закономерностей направляли лишь любознательность естествоиспытателя и желание разумно толковать вопросы об отражении света планетами и их спутниками, то за последние десятилетия поднятый Бугером вопрос стал непосредственно нужным для повседневной человеческой практики. Теперь он интересует не только физика и астрофизика, но и светотехника, определяющего яркости дорожных покрытий при искусственном освещении, военного инженера, изучающего фактуру естественных фонов и маскировочных материалов, специалиста по обработке поверхностей, характеризующего их доводку степенью глянца, и т. д.

После Бугера ряд первоклассных ученых посвящает рассеянию света матовыми поверхностями фундаментальные исследования. Однако и поныне нет ни теоретически обоснованных, ни даже эмпирических соотношений, позволяющих сколь-либо удовлетворительно характеризовать „фактуру“ шероховатых поверхностей и рассчитывать пространственное распределение

отражаемого ими света. Это показывает, что вопрос действительно трудный.

И поныне при практических расчетах почти всегда исходят из носящего имя Ламберта закона, гласящего, что сила света элемента поверхности изменяется пропорционально косинусу угла излучения или, иначе говоря, что яркость поверхности одинакова по всем направлениям. Для отражающих поверхностей этот закон во всех случаях применим лишь приближенно и притом с допустимой погрешностью лишь для весьма узкого класса поверхностей. Широта использования этого закона в практике определяется не столько его справедливостью, а скорее его простотой и отсутствием других общепризнанных закономерностей. Соотношение, возведенное в дальнейшем Ламбертом на основании весьма скромного ассортимента опытов в ранг закона природы, было для Бугера лишь самым грубым и далеко не всегда допустимым приближением, о чем свидетельствовали ему многочисленные и разнородные измерения.

Как представлял Бугер картину отражения света шероховатыми поверхностями? Он, как и до него Галилей, считал, что шероховатые поверхности имеют множество выпуклостей и впадин, и обращенные в различные стороны грани этих неровностей отражают свет по всем направлениям. По мнению Бугера, изучение распределения отражающих граней по их ориентации дает знание законов отражения света данной поверхностью.

Итак, основная идея Бугера заключается в том, что закономерности отражения света телами с матовыми поверхностями определяются чисто геометрически топографией этих поверхностей, иначе говоря тем микрорельефом, к изучению которого привлекают теперь внимание задачи оценки „качества поверхностей“ при их обработке.

Бесчисленные и обращенные в разные стороны крошечные склоны могут, по мнению Бугера, рассматриваться как миниатюрные зеркала, от каждого из которых свет отражается по закону — „угол отражения равен углу падения“, причем

свет, отраженный отдельными микрозеркалами в одном и том же направлении, складывается.

По мнению Бугера, каждая поверхность характеризуется некоторой функцией, дающей суммарную площадь элементарных зеркальных граней в зависимости от направления их нормали. Микрограни для большинства поверхностей можно считать расположенными хаотически и принимать, что их число зависит только от угла, образуемого направлением их нормали с направлением перпендикуляра к макроповерхности. Коэффициент отражения света зеркальными гранями Бугер принимает не зависящим от угла падения. На возможность затенения одних граней другими (микротени и экранирование отраженного света) Бугер указывает, но его не учитывает.

Искомая функция распределения граней, по мнению Бугера, может быть определена экспериментально, если исследуемую поверхность, придавая ей разный наклон, освещать удаленным источником света и измерять ее силу света в направлении, обратном направлению падающего света. Сила света, как считает Бугер, будет в этом случае пропорциональна освещенности перпендикулярно падающими лучами и площади граней, смотрящих в данном направлении. Откладывая в полярных координатах значения силы света в зависимости от угла падения, получаем кривую, названную Бугером „la numératrice des aspérités", что переведено: „нумератриса неровностей". Такие кривые были определены Бугером для матового серебра, гипса и бумаги. Трудной, но разрешенной Бугером задачей явилось нормирование рассматриваемой функции, то есть определение абсолютных значений радиусов-векторов нумератрисы неровностей.

Если луч зрения наблюдателя не совпадает с падающими лучами, то, по Бугеру, расчет ведется следующим образом. Находится направление, лежащее в плоскости падающего и отраженного лучей и делящее угол между ними пополам. Радиус-вектор полярной кривой (нумератрисы неровностей), соответствующий этому направлению, определяет площадь граней, отражающих свет к наблюдателю. Умножив его значение на

освещенность этих граней (а не макроповерхности), получаем величину, пропорциональную силе света поверхности в данном направлении. Деля силу света на площадь проекции поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения, получаем яркость поверхности. Такова, насколько можно судить по трактату, принципиальная схема расчета, которую Бугер, восходя от частных случаев к общим, излагает языком геометрических построений.

На основании построенной теории Бугер решает ряд частных задач, связанных с расчетом яркостей света, отраженного матовыми поверхностями. Созданную теорию Бугер применяет к изучению отражения света планетами и их спутниками и, в частности, Луною. Исходя из эмпирического соотношения, согласно которому радиус-вектор нумератрисы неровностей пропорционален $a \cos \delta + b \cos^m \delta$, где a, b и m — постоянные, а δ — угол с нормалью, Бугер вычисляет распределение яркости по диску планеты и зависимость общего количества отражаемого ею к земле света от фазового угла (угла между направлением падающих на нее солнечных лучей и направлением на земного наблюдателя).

Теория отражения света матовыми поверхностями и ее применения к фотометрии планет изложены Бугером в трактате далеко не просто, расшифровка сущности и деталей построений Бугера требует много труда, а порою и догадок; в научной литературе теория Бугера, повидимому, сколь-либо обстоятельно до сих пор не пересказывалась, ее изложение ограничивалось, как правило, исходными предпосылками, как, например, в посвященной памяти Бугера и Ламберта книге Целльнера* и работе Зеелигера.** Однако, если детали теории Бугера

* F. Zöllner. Photometrische Untersuchungen mit besonderer Rücksicht auf die physische Beschaffenheit der Himmelskörper. Leipzig, 1865.

** H. Seeliger. Zur Photometrie zerstreut reflectirender Substanzen. Sitzungsberichte des mathematisch-physikalischen Classe der Akademie der Wissenschaften zu München. 1889.

оказались забытыми раньше, чем они смогли быть использованы другими исследователями, то положенные в основу теории представления и поныне успешно служат в науке.

Многие теоретические и экспериментальные работы, выполненные в прошлом и текущем столетиях, являются попытками опровергнуть исходные положения теории Бугера или, что чаще, их подтвердить, уточнить и применить. Авторы работ, опубликованных по этому вопросу за последние десятилетия, уточняют теорию Бугера, исходят из Гауссовского распределения микрограней по отношению к макроповерхности, принимают, что коэффициент отражения от микрограней, подчиняясь формулам Френеля, зависит от угла падения на них света. В ряде случаев видоизмененная теория Бугера оказывается безупречной. Так, например, сравнительно недавно было показано, что при изучении отражения света дорожными покрытиями, можно заменять поверхность дороги системой из бесконечного числа разноориентированных полированных граней. Эксперименты подтверждают справедливость этой гипотезы. Построенная на ее основе теория удобно и достаточно точно охватывает результаты измерений, позволяет просто и быстро строить кривые равной яркости на перспективном изображении дороги, освещенной источником света с заданным светораспределением.

Гипотеза Бугера может с успехом служить при описании явлений отражения света волнующейся поверхностью моря, например при расчетах распределения яркости в солнечной и лунной дорожках при различных высотах светил и разной степени волнения.

Эти примеры показывают жизненность представлений Бугера об отражении света негладкими поверхностями. Конечно, теория Бугера не является общей и строгой; в ней больше геометрии, чем физики. Нужно учитывать, что свет проникает в поверхностные слои отраженного тела и рассеивается ими. Г. И. Покровский в своих работах 1924—1926 гг. принимал, что отражение света определяется как Бугеровым зеркальным отражением от граней внешней поверхности, так и рассеянием

света прилежащими к поверхности слоями. В ряде случаев необходимо учитывать диффракцию падающих световых волн на неровностях, интерференцию волн, отраженных отдельными элементами поверхности.

Строгая волновая теория диффузного рассеяния при малых шероховатостях была создана Л. И. Мандельштамом, изучавшим флуктуационное рассеяние света на свободных поверхностях жидкости, считая их непрерывно деформирующимися вследствие теплового движения.

Степень применимости представлений Бугера очевидно определяется характером поверхностного слоя, соотношением размеров неровностей и длин волн падающего света, условиями освещения и наблюдения.

Можно отметить, что теории отражения света шероховатыми поверхностями Бугером было уделено особо много внимания, а сколь-либо заметной роли в развитии оптики эта столь детально разработанная теория не сыграла, в то время как другие, порою лишь мимоходом поднятые в трактате вопросы оставили заметный след в истории оптики. Повидимому, здесь повлияли трудность изложения теории и сложность выполнения по ней расчетов.

Практика пошла по пути применения закона Ламберта, предельно простого и к тому же кажущегося теоретически обоснованным.

Теория диффузного отражения, данная Бугером, конечно устарела, но все же степень ее забвения не соответствует возможности ее использования в видоизмененной форме и при современном уровне развития науки.

Третья книга трактата, достойно его завершающая, посвящена изысканиям о прозрачности и непрозрачности тел. В ней устанавливается показательный (экспоненциальный) закон ослабления света при его прохождении через поглощающую среду, рассматриваются различные следствия из этого закона и исследуются вопросы рассеяния света и его прохождения через атмосферу и морскую воду.

Особый интерес представляет первый раздел „О законе, которому подчинены изменения света, проходящего сквозь различные толщи прозрачного тела“.

Бугер устанавливает как экспериментально, так и теоретически закон, записываемый в настоящее время в виде

$$F = F_0 e^{-kx},$$

где F_0 — начальное количество света, а F — количество света после прохождения пути x в поглощающей среде, где k — константа, характеризующая поглощающую способность этой среды.

Этот закон приобрел величайшее значение в физике и технике как один из наиболее общих и строгих законов природы. Закон Бугера выдерживает жесточайшую экспериментальную проверку. С. И. Вавилову удалось доказать на опыте справедливость закона Бугера при изменении плотности падающего светового потока в 10^{19} раз.* При этом поглощающее вещество (желатиновый слой, окрашенный родамином) было таково, что поглощение сопровождалось различными вторичными процессами, как то: нагреванием, флуоресценцией, фотохимическим разложением. При изменении плотности падающего лучистого потока от 10^{-11} до $10^{8} \frac{\text{эрг}}{\text{сек. см}^2}$ показатель поглощения оставался неизменным. Отступления от закона Бугера, как показали в 1926 г. С. И. Вавилов и В. Л. Левшин, могут наблюдаться лишь при особо больших длительностях возбужденных состояний молекул (например, при фотолюминесценции урановых стекол).

Экспоненциальный закон был установлен Бугером для поглощения видимого света, но ему подчиняется ослабление прямого потока энергии, который несет любого вида однородная радиация. Область его применения непрерывно расширялась вместе с раз-

* С. И. Вавилов. О независимости коэффициента поглощения света от яркости. Поглощение света ничтожно малых интенсивностей. Известия Физического института при Московском научном институте. Том I, выпуск III, М., 1920.

витием науки, и он сейчас, скажем, столь же привычен лицам, рассчитывающим поглощение рентгеновых и гамма-лучей, как и фотометристам. Это понятно, поскольку к данному закону непосредственно приводит обычно выполняющееся соотношение

$$\frac{dF}{F} = -kdx,$$

где $\frac{dF}{F}$ — относительное изменение потока радиации при прохождении пути dx. Установление экспоненциального закона следует рассматривать как крупнейшее научное открытие. Предшественникам и современникам Бугера представлялось естественным, что при последовательном прохождении равных толщин количество света ослабляется на равные порции (а не на равные доли) до полного исчезновения. Не следует этому изумляться. Некоторые исследователи еще в прошлом столетии пытались определить абсолютное значение предельной глубины проникновения дневного света в толщу моря, не сознавая, что на самом деле они лишь измеряли порог чувствительности приемников света в погружавшихся в море измерительных устройствах.

Содержание третьей книги трактата в значительной мере заимствовано Бугером из его первого большого труда по фотометрии—„Опыта о градации света", изданного в 1729 г. Уже в этом первом труде дается полное экспериментальное и теоретическое доказательство экспоненциального закона и выводится большое число следствий из него. Через тридцать один год после выхода этой книги Бугера, а именно в 1760 г., Ламберт публикует свой бессмертный труд по фотометрии — „Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae". Он излагает закон ослабления света в той же форме, что и Бугер, и ссылаясь на него. Поэтому досадной ошибкой в истории физики следует признать забвение генезиса закона поглощения, в результате чего этот закон получил имя Ламберта, на что последний и сам, конечно, никогда не стал бы претендовать. Как писал акад. С. И. Вавилов еще в 1924 г.: „Во всяком случае, имя Бугера в истории оптики должно

стоять наряду с именами Ньютона и Гюйгенса... Трудно постигнуть основание той упорной исторической несправедливости, с которой до нашего времени законы, совершенно ясно и отчетливо формулированные Бугером, соединяются с именами других авторов (закон Беера, законы Ламберта и пр.)".*

На эту ошибку теперь обратили внимание и другие авторы.**

В первой главе третьей книги трактата Бугер на основании прямого опыта говорит о том, что „свет, проходя однородные и одинаково толстые слои прозрачного тела, не уменьшается согласно членам арифметической прогрессии". Во второй главе Бугер, на основании логических умозаключений, утверждает что „при возрастании толщин на равные величины свет уменьшается, подобно членам геометрической прогрессии". В третьей главе — „Об использовании логарифмической кривой для представления ослабления света" — Бугер показывает, что количества света, прошедшего через различные толщи тела, выражаются ординатами логарифмической кривой, причем каждой среде соответствует своя кривая в зависимости от ее прозрачности. Бугер устанавливает в следующей, четвертой главе меру прозрачности, говоря, что „веществами в пять или шесть раз более прозрачными будут те, которые вызывают то же ослабление света, будучи взяты в пять или шесть раз более толстыми". Показателем прозрачности у Бугера служит подкасательная логарифмической кривой, то есть величина, пропорциональная „свободной длине пути" $\frac{1}{k}$, где k — показатель поглощения. Эту величину Бугер называет „удельной прозрачностью". В пятой главе Бугер указывает, что „непрозрачные тела непрозрачны не потому, что они полностью преграждают путь свету, а потому, что... они заставляют его претерпевать ослабление слишком сильное, чтобы он мог затем оказывать

* С. И. Вавилов. Пьер Бугер. Опыт о градации света. Успехи физических наук, том IV, вып. 2—3, 1924.

** F. H. Perrin. Whose Absorption Law? Journal Optical Society America, vol. 38, N 1, January 1948.

заметное впечатление на наши глаза". Отметим, что в „Трактате" Бугер оставляет в стороне рассмотрение физической сущности явления поглощения света, чему посвящена отдельная глава в первом труде Бугера „Опыт о градации света", представляющая безусловный интерес для истории физики.

Во втором разделе третьей книги трактата излагается „способ вычисления сил светов, проходящих различные толщи прозрачных тел, когда лучи вполне параллельны". Исходя из установленного им закона, Бугер принимает, что „когда свет проходит через различные толщи одного и того же тела, то отношение разности логарифмов двух ординат или количеств света... к толще..., заключенной между ними, всегда таково же, как и отношение между разностью логарифмов двух любых других ординат или количеств света и соответствующею толщиною". Далее Бугер переходит к решению, исходя из этого принципа, следующих, практически важных, частных задач:

„Найдя... часть света, проходящую сквозь данную толщу тела, обладающего повсюду одинаковой прозрачностью, определить часть света, проходящего сквозь все другие толщи того же тела".

„Зная уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении известной толщи прозрачного тела, найти толщину, на которую свет должен проникнуть в это же тело, дабы претерпеть любое желаемое уменьшение".

„Зная... уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении некоторой толщи различных прозрачных тел, найти удельную прозрачность этих тел".

„Найти подкасательную логарифмической кривой (удельную прозрачность, — *А. Г.*), свойственной прозрачному телу".

„Зная из опыта уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении известной толщи прозрачного тела, определить толщину, которую необходимо придать телу, дабы сделать его непрозрачным".

При решении последней задачи Бугер принимает, что солнце становится невидимым, если его свет ослабить в девятьсот

миллиардов раз. Бугер приводит это значение с двенадцатью знаками, но приходит к нему из неверных расчетов (не учитывая многократных отражений в стопе стекол).

В третьем разделе третьей книги трактата дается для случая прохождения света через поглощающее тело „способ вычислять силы света в том случае, когда светящее тело не удалено на бесконечное расстояние“, то есть когда пучок света не является параллельным. Содержание этого раздела не представляется ныне существенным. Этот раздел разбивается на три задачи:

Первая задача: „Сравнить в общем виде различные силы, коими обладает свет на различных расстояниях от светящего тела, когда этот свет проходит сквозь тело, повсюду одинаково прозрачное“.

Вторая задача: „Установить заданное отношение между светом, воспринимаемым непосредственно от светящего тела, и светом, воспринимаемым с того же расстояния после прохождения сквозь прозрачное тело“.

Третья задача: „Два светящих тела... расположены на некотором расстоянии друг от друга в среде, повсюду одинаково прозрачной; требуется найти отношение, которое существует между их светами, когда последние воспринимаются в заданных точках..., или, напротив, найти, в каких точках... надлежит воспринимать эти светы, если угодно, чтобы последние находились в некотором заданном отношении“.

Изложение этого раздела строится следующим образом. За описанием общей задачи следуют пояснения, а затем решения, соответствующие отдельным частным ее формулировкам.

Значительно больший интерес представляет раздел четвертый — „Об уменьшении, претерпеваемом светом, проходящим сквозь тела, не везде одинаково плотные“. В начале этого раздела Бугер пишет:

„...естественно полагать, что бо́льшие или меньшие сгущения вызывают в неравномерно сгущенном теле в точности

такое же действие в отношении пресечения пути лучам, что и бо́льшие или меньшие толщины в теле, имеющем повсюду одну и ту же плотность. Свет может претерпевать равные изменения лишь встречая равное число частиц, способных задерживать лучи или рассеивать их; однако для того чтобы свет встречал равное число этих частиц, необходимо, чтобы он проходил сквозь меньшие или бо́льшие толщи, смотря по тому, насколько более или менее плотна среда... Отсюда надлежит сделать вывод, что в нашем случае пропорциональными разностям логарифмов различных количеств света являются не толщины..., а массы вещества, содержащиеся в этих толщинах".

Столетием позже, в 1852 г., А. Беер в своей работе об определении поглощения света окрашенными жидкостями приходит к выводу, что при заданном пропускании концентрация и толща обратно пропорциональны. Однако, как видно из приведенной выше цитаты, это положение было высказано задолго до Беера в совершенно ясной форме Бугером. Таким образом, нет оснований говорить о законе Беера, законе Ламберта — Беера, законе Бугера — Ламберта — Беера.

Бугер принимает, что в случае среды переменной плотности удельная прозрачность обратно пропорциональна плотности или, иначе говоря, показатель поглощения k пропорционален плотности в данной точке среды, в соответствии с чем закон ослабления света принимает вид

$$F = F_0 e^{-\int k \cdot dx} .$$

Дальше Бугер переходит к рассмотрению вопросов о прозрачности атмосферы. Ссылаясь на Мариотта, он принимает, что плотность воздуха пропорциональна давлению на данной высоте, и показывает, что отсюда вытекает, что плотность воздуха, так же как и давление, убывает с высотой по экспоненциальному закону. Бугер говорит, что это правило хорошо оправдывается, если исключить самые нижние слои атмосферы,

и показывает, ссылаясь на свои высокогорные наблюдения в Перуанских Кордильерах, как следует наилучшим способом определять с помощью барометра высоту гор.

Попутно Бугер на основании расчетов и своих наблюдений отмечает, что на больших высотах, где воздух более разрежен и заметная доля его расположена ниже, земные предметы видны на бо́льшее расстояние, а свет звезд более ярок, чем у поверхности земли.

Далее Бугер переходит к расчету масс воздуха, сквозь которые должны проходить лучи небесных светил перед тем, как достигнуть земной поверхности. Вначале он рассматривает случай, когда светило находится в зените, и для этого подсчитывает наиболее вероятные значения подкасательной той логарифмической кривой, которая определяет зависимость плотности воздуха от высоты. Бугер говорит:

„Если бы атмосфера имела повсюду ту же плотность, что и у поверхности земли, то она не простиралась бы на столь большое расстояние от земли, а просто имела бы высоту в 3911 или в 4197 туаз; таким образом, подобная толща плотного воздуха была бы равноценна действительной высоте атмосферы, которую пронизывает свет небесных светил, находящихся в зените".

Итак Бугер в совершенно ясной и точной форме использует понятие, именуемое теперь „приведенной высотой атмосферы".

Он приводит таблицы масс воздуха, пронизываемых лучами светил в зависимости от их возвышения, а также соответствующие значения прозрачности атмосферы.

Приводимые Бугером значения воздушной массы в зависимости от зенитного расстояния практически не отличаются от тех, которые приняты сейчас и которые напрасно связывают с именем Бемпорада.

Пятый раздел посвящен теоретическому изучению прохождения света через рассеивающую среду, каковой являются воздух и морская вода, расчету яркости рассеянного света и дальности видимости. В начале этого раздела Бугер пишет:

„...Мы должны исследовать отражение света, проходящего сквозь прозрачное тело, самими молекулами оного; этот свет частично отсылается в направлении к нашим глазам. Действие... происходит лишь с теми лучами, кои задерживаются каждым слоем прозрачного тела, ибо свет, проходящий беспрепятственно, продолжает свой путь далее. Хотя свет, задерживаемый каждым слоем, может считаться бесконечно малым по сравнению с проходящим светом, тем не менее следует принять во внимание, что множество слоев является бесконечным, и это может привести к тому, что отраженный свет будет вполне сравнимым с проходящим. Также не имеет значения и то, производится ли отражение частицами прозрачного тела или каким-либо флюидом, содержащимся в порах последнего. Для нас это совершенно безразлично, ибо мы, не связывая себя частной гипотезой, будем довольствоваться наблюдением фактов и извлечением из них лишь непосредственно следующих заключений...“.

Бугер дает способ расчета яркости освещенной мутной среды, в которой, наряду с поглощением, происходит также рассеяние света. Это позволяет Бугеру вычислять яркость рассеянного атмосферой света, яркость неба для наблюдателя, находящегося на заданной высоте над уровнем земли, и яркость воздушной дымки, застилающей для него земной ландшафт. При этом Бугер указывает, что синие лучи рассеиваются сильнее красных, что рассеянный свет сосредоточивается в основном по направлениям вперед, что назад света рассеивается меньше.

Бугер строит безупречную теорию видимости предметов через освещенную мутную среду. Теория учитывает, что по мере удаления от наблюдаемого предмета яркость доходящих от него лучей падает вследствие поглощения и рассеяния света средой, но на нее налагается все возрастающая яркость дымки, обусловленной рассеянием в толще среды между наблюдателем и предметом. При этом видимый яркостный контраст между предметом и фоном падает, и, при достижении порогового значения контраста, предмет становится невидимым. Бугер

применяет построенную им общую теорию к расчету предельной глубины видимости погруженных под воду предметов, к расчету дальности видимости удаленных деталей ландшафта, к толкованию вопросов воздушной перспективы. При этом Бугер учитывает, что разные слои среды (воды, воздуха) по-разному освещены, что плотность воздуха, а следовательно и рассеяние, на различных высотах различны. Соотношения, приводимые Бугером, совершенно правильны, и можно лишь сожалеть о том, что они столь долго оставались в забвении. Итак, Бугера следует считать творцом и той главы фотометрии, которую целесообразно называть геофотометрией.

Трактат завершают следующие слова Бугера:

„Все эти вопросы, несмотря на все наши попытки дать им объяснение, оставляют, конечно, весьма широкое поле изысканий для любознательных лиц. Мы признаемся в этом чистосердечно и с удовольствием предоставляем другим преимущество завершить то, что мы смогли лишь едва начать“.



СПИСОК ПЕЧАТНЫХ ТРУДОВ БУГЕРА

1. Comparaison de la force de la lumière du soleil, de la lune et des plusieurs chandelles. Mém. Ac. Sc. Paris, 1726.
2. Mémoire sur la mâture des vaisseaux. Paris, 1727.
3. Méthode d'observer sur mer les hauteurs des astres. Paris, 1729.
4. Essai d'Optique sur la gradation de la lumière. Paris, 1729. Книга переиздана в Париже в 1921 г. в серии „Les maîtres de la pensée scientifique".
5. De la mèthode d'observer en mer la déclinaison de la boussole. Paris, 1731.
6. Sur le mouvement curviligne des corps dans les milieux qui se meuvent. Mém. Ac. Sc. Paris, 1731.
7. Sur de nouvelles courbes, auxquelles on peut donner le nom de lignes de poursuite. Mém. Ac. Sc. Paris, 1732.
8. Du choc d'un fluid etc. Mém. Ac. Sc. Paris, 1733
9. Sur des lignes courbes qui sont propres à former les voûtes en dome. Mém. Ac. Sc. Paris, 1734.
10. Comparaison de deux lois que la Terre et les autres planètes doivent observer dans la figure que la pésanteur leur fait prendre. Mém. Ac. Sc. Paris, 1734.
11. Entretiens sur la cause d'inclinaisons des orbites des planètes. Paris, 1734.
12. Sur la longuer du pendule dans la zone torride. Mém. Ac. Sc. Paris, 1736.
13. De la manière de determiner la figure de la Terre par la mesure des degrés de latitude et de longitude. Mém. Ac. Sc. Paris, 1736.
14. Sur les réfractions astronomiques dans la zone torride. Mém. Ac. Sc. Paris, 1739.
15. Expériences faites à Quito sur la dilatation et la contraction des métaux. Mém. Ac. Sc. Paris, 1745.
16. Sur la problème de la mâture des vaisseaux. Mém. Ac. Sc. Paris, 1746.
17. De l'impulsion des fluides etc. Mém. Ac. Sc. Paris, 1746.
18. Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements. Paris, 1746.
19. Sur une nouvelle construction du Loch etc. Mém. Ac. Sc. Paris, 1747.
20. De la mesure des diamètres des plus grandes planètes; description d'un nouvel instrument, héliomètre etc. Mém. Ac. Sc. Paris, 1748.

21. Entretiens sur la cause de l'inclinaison des orbites des planètes. Paris, 1748.
22. La figure de la Terre, déterminée par les observations des Messieurs Bouguer et de la Condamine, de l'Académie Royale des Sciences, envoyès au Pérou, pour observer aux environs de l'Équateur; avec une relation abrégée de ce voyage, qui contient la description du pays dans lequel les opérations ont été faites. Paris, 1749.
23. Sur les observations de la parallaxe de la Lune etc. Mém. Ac Sc. Paris, 1751.
24. Sur la forme des corps les plus propres à tourner sur eux mêmes etc. Mém. Ac. Sc. Paris, 1751.
25. Sur les opérations nommées corrections par les pilotes. Mém. Ac. Sc. Paris, 1752.
26. Justification des Mémoires de l'academie des sciences de 1744, et du livre de la Figure de la Terre. Paris, 1752.
27. Nouveau traité de navigation, contenant la theorie et la pratique du pilotage. Paris, 1753.

Примечание. Книга была переиздана на французском языке в 1761 г. в переработке де-ла-Кайля и в 1792 г. в переработке Лаланда. В русском переводе Н. Г. Курганова „Бугерово новое сочинение о навигации" вышло в четырех изданиях, а именно в 1764, 1785, 1799, 1802 гг., в конспективной форме в 1775 г. Составленные Н. Кургановым „Пополнения Бугеровой науки мореплавания" вышли в 1794 и 1801 гг.

28. Sur les dilatations de l'air dans l'atmosphère. Mém. Ac. Sc. Paris, 1753.
29. Lettre à M.***, dans laquelle on discute divers points d'astronomie pratique et où l'on fait quelques remarques sur le supplément au Journal historique, etc, de M. de L. C. Paris, 1754.
30. Sur la direction qu' affectent les fils-à-plomb. Mém. Ac. Sc. Paris, 1754.
31. Solutions des principaux problèmes de la manoeuvre des vaisseaux. Mém. Ac. Sc. Paris, 1754—1755.
32. Sur la grandeur apparente des objects etc. Mém. Ac. Sc., Paris, 1755.
33. De la manoeuvre des vaisseaux, ou traité de méchanique et de dynamique. Paris, 1757.
34. Remarques sur les moyens de mesurer la lumière, avec quelques applications de ces moyens. Mém. Ac. Sc. Paris, 1757.
35. Observations faites par ordre de l'académie pour la vèrification du degré du méridien compris entre Paris et Amiens (совместно с Camus, Cassini, Pingré). Paris, 1757.
36. Traité d'Optique sur la gradation de la lumiére. Paris, 1760.

Примечание. Латинский перевод издан в 1762 г. под наименованием: „Bougeri Optice de Diversis Luminis Gradibus Dimetiendis, in latinum conversum a J. Richtenburg". MDCCLXII, Viennae, Pragae et Tergesti.

КОММЕНТАРИЙ

Общие замечания

[1] Перевод сделан с книги „Traité d'Optique sur la gradation de la lumière: ouvrage posthume de M. Bouguer, de l'Académie Royale des Sciences, etc.". A. Paris. MDCCLX. Некоторые данные о переводе приведены в „Послесловии редактора".

[2] Биография Бугера, очерк его деятельности, ее значения для развития науки и ее оценки в России даны в отдельной статье и в „Послесловии редактора". В настоящем издании восстановлена старая русская транскрипция (Бугер), фонетически более правильная (Бугер был уроженец Бретани), чем получившие распространение за последнее время (Буге, Бугэ).

[3] Де-ла-Кайль Николай Людовик (Nicolas-Louis de la Caille), подготовивший к печати трактат Бугера и автор „Предуведомления" к этой книге, — друг Бугера, астроном, член Академии наук в Париже, в котором родился в 1713 г. и скончался в 1762 г. В 1756 г. он был избран почетным членом Петербургской Академии Наук.* Де-ла-Кайль — автор многочисленных работ по астрономии и геодезии и курса оптики, выдержавшего много изданий на французском и латинском языках. Биография де-ла-Кайля, написанная известным французским астрономом Деламбром, имеется в шестом томе „Biographie universelle (Michaud)".

Русская транскрипция его фамилии у разных авторов различна. Фонетически правильной была бы: де-ла-Кай. Ломоносов писал: Лакайль. В списке членов Российской Академии Наук он числился под фамилией Де ла Кайль.

[4] Используемые Бугером фотометрические термины переведены на русский язык текстуально, а не в соответствии с принятой в настоящее время терминологией. Так, например, Бугер вводит величину „la force de

---

* Б. Л. Модзалевский. Список членов Императорской Академии Наук 1725—1907. СПб., 1908.

la lumière“ и широко ею пользуется. Этот термин, равно как и остальные, переведен буквально, то есть назван в русском переводе „силой света“, хотя содержание его не совпадает с тем, которое вкладывается в современной фотометрической науке в одноименное понятие. Величина „la force de la lumière“ в понимании Бугера есть количественная мера света, которой в современной системе фотометрических понятий могут соответствовать освещенность, световой поток, сила света. Чаще всего она применяется Бугером в том смысле, какой точно можно было передать термином „освещенность“, хотя порою используется им для характеристики источника света, поскольку Бугер пишет и об абсолютной силе света светящего тела. Сила света от удаленного источника, при обычном толковании Бугером этого термина, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Это отличие в терминологии совершенно необходимо иметь в виду при чтении перевода, иначе многое может показаться читателю трудным, недостаточно точным или, что еще хуже, может быть воспринято неверно.

Может быть можно было бы уменьшить для читателя некоторые трудности, переведя на русский язык термин „la force de la lumière“ другими словами, чем „сила света“ (например „крепость света“, „напряженность света“). Однако вряд ли это было бы правильно, учитывая общие требования к переводу сочинений классиков науки, а также потому, что термин „сила света“, построенный аналогично „силе звука“, лучше выражает понятие Бугера, чем ту характеристику светящего тела, которую теперь называют силой света и которую, может быть, правильнее было бы называть иначе, — хотя бы силою свечения.

Другим термином, которым часто пользуется Бугер, является „l’intensité de la lumière“, — также буквально переведенный на русский язык словами „интенсивность света“. Чаще всего Бугер вкладывает в это понятие смысл, тождественный современному понятию яркости, хотя порой пользуется термином „интенсивность“ и для обозначения других величин (например, освещенности), рассматривая его, как это и теперь делается, как слово из обычной речи.

Бугер специально посвящает главу VIII первого раздела первой книги трактата обоснованию различия в сущностях понятий об абсолютном количестве света (световом потоке, силе света) и интенсивности света (яркости). Последняя величина, как с великолепной образностью формулирует Бугер, „выражает лишь большую или меньшую сгущенность лучей, независимо от их общего количества“. Современному понятию яркости соответствуют также термины Бугера „la vivacité de la lumière“ (переведено — яркость света), „la vivacité de la couleur“ (переведено — яркость цвета).

В нижеследующей таблице перечислены основные применяемые Бугером фотометрические наименования и указан их перевод и толкование при использовании современной терминологии.

Термин	Перевод	Примечание
La quantité de la lumière	Количество света	Аналогично понятию о световом потоке.
La force absolue de la lumière	Абсолютная сила света	Аналогично понятию о силе света источника.
La force de la lumière	Сила света	Почти всегда имеет значение освещенности, реже силы света, еще реже — яркости.
L'intensité de la lumière (couleur)	Интенсивность света (цвета)	Чаще всего аналогично понятию яркости, порою — интенсивности в широком смысле слова и может, например, обозначать освещенность.
La vivacité de la lumière (couleur)	Яркость света (цвета)	Аналогично понятию яркости.

В качестве фотометрических эталонов Бугеру служили свечи. Слово „bougie" переведено как „свеча"; можно предполагать, что этим термином Бугер обозначал восковую свечу. Слово „chandelle" передано в русском переводе словами „сальная свеча"; этот термин встречается только в третьей и девятой главах второго раздела первой книги трактата. Некоторые соображения о вероятных значениях сил света использовавшихся Бугером источников приведены в примечании 50.

5 Приводим данные о старых французских мерах длины, которыми пользовался Бугер. Главной единицей был указной фут, иначе французский или парижский (pied de roi, p. francais, p. de Paris); он разделялся на дюймы, линии и скрупулы в двенадцатикратном отношении. Парижский фут равен 0.32484 м, т. е. не соответствовал русскому футу, а французский дюйм не равнялся русскому дюйму. Более крупными единицами являлись туаз (туаза, тоаз) и льё. Туаз (toise) равен 6 французским футам. Льё (lieue) — применявшаяся в обиходе путевая мера (миля) переменного значения. Различали почтовую милю (lieue de poste), морскую милю (lieue marine) и общую милю (lieue de terre, или lieue commune), равную 4444 м.

Соотношения между мерами длины даны в следующей табличке:*

* См.: Метрология, или описание мер, весов, монет и времясчисления нынешних и древних народов. Сочинение Θ. Петрушевского" (СПб., в типографии Департ. народн. просв., 1831), а также комментарии Н. И. Идель-

La lieue commune	общая миля		4444 м
La toise	туаз	6 футов	1.949 м
Le pied	фут		32.48 см
Le pouce	дюйм	$^1/_{12}$ фута	2.707 см
La ligne	линия	$^1/_{12}$ дюйма $= ^1/_{144}$ фута	2.256 мм

Примечания к первой книге

[6] Повидимому, рассуждение автора могло бы быть пояснено, например, следующим чертежом (рис. 1), где P_1, P_2, P_3... — свечи, D — непрозрачное тело, E — освещенная свечами удаленная поверхность, на которую свечи отбрасывают тень от тела D.

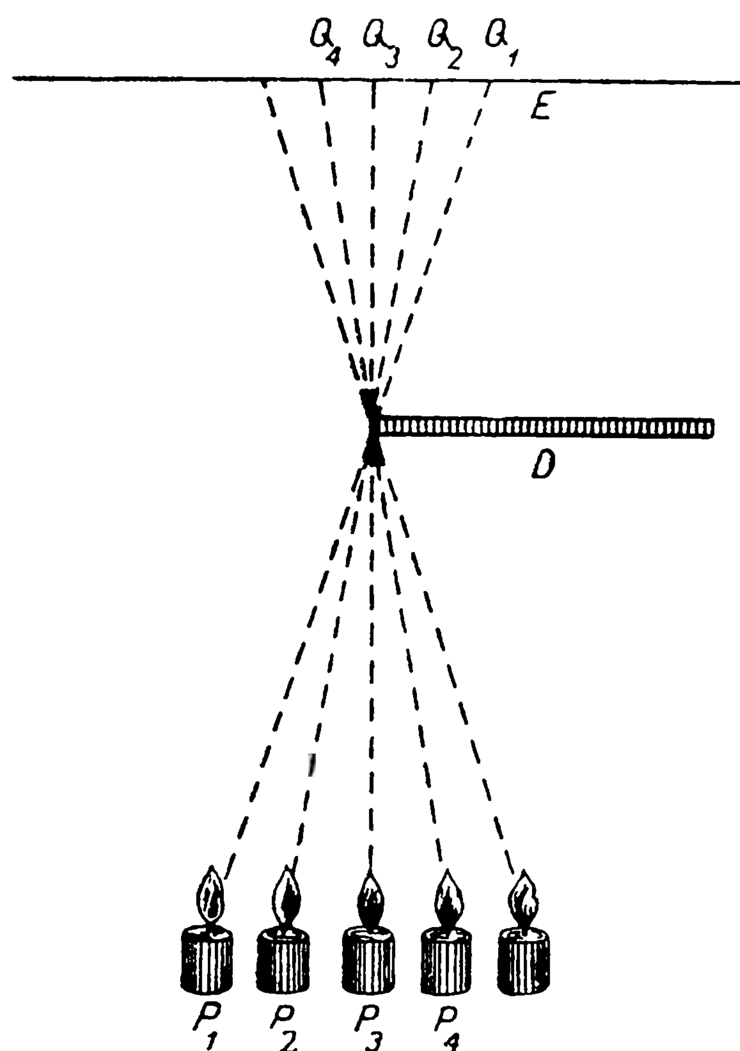


Рис. 1.

Q_1 — граница тени, область Q_1 Q_2 освещена одной свечой, Q_2 Q_3 — двумя свечами, Q_3 Q_4 — тремя свечами, и т. д.

[7] Различению границы между 39-й и 40-й ступенями соответствует яркостный контраст $\frac{40-39}{40}=\frac{1}{40}$, т. е. 2 5%. При расчетах Бугер принимает пороговое значение контраста, еще различаемого глазом, равным $\frac{1}{64}$ (см. книга первая, раздел второй, глава I и примечание 33).

[8] Этот существенный фотометрический закон был сформулирован в 1604 г. Иоганном Кеплером (Iohann Kepler, 1571 — 1630) в первой главе его сочинения „Ad Vitellonem Paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur“ следующим образом: „Силы света расходящихся лучей убывают в обратных отношениях к воспринимающим плоскостям“.

[9] Пользуясь современной терминологией, следует читать „освещенности“ (см. примечание 4).

[10] Определим соответствующее значение прозрачности τ на 1 км. Согласно Бугеру, при прохождении 200 туаз, или 390 метров, в ясную по-

---

сона к книге А. Клеро „Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики“ (Изд. Академии Наук СССР, 1947).

году теряется примерно $\frac{1}{100}$ света. Отсюда $\tau^{0.390} = \frac{99}{100}$ или $\tau = 97.5\%$ на километр, что соответствует исключительно высокой прозрачности атмосферы.

[11] На фиг. 2 в оригинале, как это непосредственно явствует из ряда мест текста, ошибочно свеча и светильник перемещены местами: у буквы A вместо светильника изображена свеча, а у буквы B вместо свечи ошибочно изображен светильник. Издатели перевода устранили при воспроизведении фиг. 2 трактата эту ошибку, наличие которой затруднило бы читателей.

[12] В оригинале опечатка: вместо AK указано AL.

[13] Повидимому, ошибочно указано $20\frac{1}{16}$ вместо $5\frac{1}{16}$.

[14] Рассмотрим более подробно теорию предложенного Бугером способа изменения освещенности при фотометрировании с получением при помощи линзы промежуточного изображения источника света.

Обратимся к рис. 2, построенному в соответствии с исправленной (примечание 11) фиг. 2 на стр. 21 трактата. Световое пятно TX получается на экране от даваемого линзой L изображения N источника света B. Изменение освещенности в точке Q достигается перемещением линзы L.

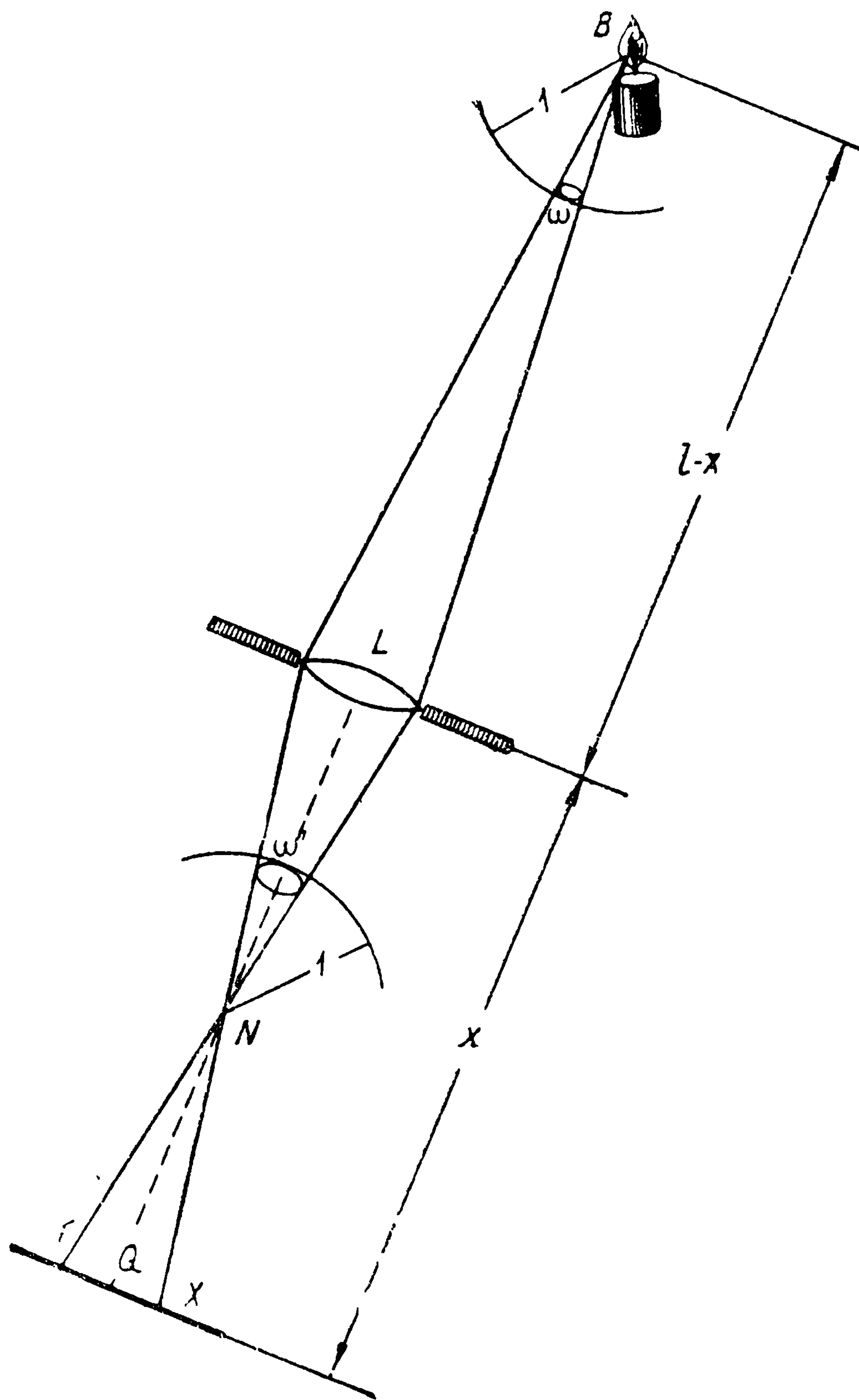


Рис. 2.

Если обозначить через I силу света источника B, а через ω — телесный угол, под которым из источника видно световое отверстие линзы, то, считая этот угол малым, можно написать, что падающий на линзу световой поток F равен:

$$F = I\omega.$$

Если обозначить через t коэффициент пропускания линзы, то выходящий из линзы световой поток F' равен:

$$F' = tI\omega.$$

Этот световой поток распределен в телесном угле ω', который также считаем малым, откуда следует, что сила света I' изображения N равна:

$$I' = \frac{F'}{\omega'} = tI\frac{\omega}{\omega'} = t\frac{NL^2}{BL^2}I.$$

Освещенность E' в точке Q экрана равна:

$$E' = \frac{I'}{QN^2} = t\frac{NL^2}{BL^2 \cdot NQ^2}.$$

Обозначив через d диаметр светового отверстия линзы, а через TX — поперечник светового пятна на экране, получаем

$$\frac{d}{TX} = \frac{NL}{NQ},$$

откуда

$$E' = td^2\frac{1}{BL^2 \cdot TX^2}I.$$

Обратной пропорциональностью освещенности E' произведению $BL^2 \cdot TX^2$ и пользуется в своих расчетах Бугер.

Рассмотрим, как будет изменяться освещенность E' при перемещении линзы L. Обозначим через l расстояние BQ от источника до экрана, которое будем считать постоянным, а через x переменное расстояние LQ от линзы до экрана. Линзу считаем тонкой.

Тогда расстояние от линзы до источника равно:

$$BL = l - x.$$

Расстояние от линзы до изображения определится из соотношения:

$$\frac{1}{BL} + \frac{1}{NL} = \frac{1}{f},$$

где f — заднее фокусное расстояние линзы.

Отсюда

$$NL = \frac{(l-x)f}{l-x-f}.$$

Расстояние NQ будет равно:

$$NQ = x - NL = \frac{lx - x^2 - fl}{l - x - f}.$$

Подставив в формулу для E' значения NL, BL и NQ, получаем:

$$E' = \frac{tf^2 I}{[x(l-x) - fl]^2}.$$

Если обозначить через E освещенность в точке Q при отсутствии линзы, то

$$E = \frac{I}{l^2}.$$

Введение линзы ослабляет свет в $\frac{E}{E'}$ раз, где: $\frac{E}{E'} = \frac{1}{t}\left[\frac{x(l-x)-fl}{fl}\right]^2.$

При изменении расстояния x от экрана до линзы величина E' достигает минимума при наибольшем значении произведения $x(l-x)$, то есть при $x = \frac{l}{2}$.

Итак, при удалении линзы L от воспринимающего свет экрана освещенность будет падать до тех пор, пока линза не дойдет до середины расстояния между экраном и источником света; при дальнейшем удалении линзы от экрана освещенность будет вновь возрастать.

Применение положительных и отрицательных линз для изменения освещенности экрана при визуальном фотометрировании, хотя и описывается в некоторых руководствах по фотометрии, но этот способ в настоящее время мало известен и почти не используется.

[15] Обратимся к фиг. 3 на стр. 26 трактата. Бугер, особо это не отмечая, принимает, что сила света I свечи P одинакова как в направлении к экрану E, так и к экрану D и указывает, что эти экраны должны быть одинаково наклонены по отношению к линии ED, их соединяющей, то есть, что угол падения α одинаков.

Освещенности экранов E и D в этих предположениях соответственно равны

$$\frac{\cos\alpha}{PE^2} \quad \text{и} \quad \frac{I\cos\alpha}{PD^2}.$$

Если перемещением источника P достигнуть для глаза A равенства яркостей видимого непосредственно экрана E и экрана D, наблюдаемого в отраженном от зеркала B свете, то

$$\frac{I\cos\alpha}{PE^2}=r\,\frac{I\cos\alpha}{PD^2},$$

где r — коэффициент отражения зеркала B. Отсюда

$$r=\frac{PD^2}{PE^2}.$$

Это же соотношение справедливо и применительно к другой предлагаемой Бугером схеме, иллюстрируемой фиг. 4 трактата.

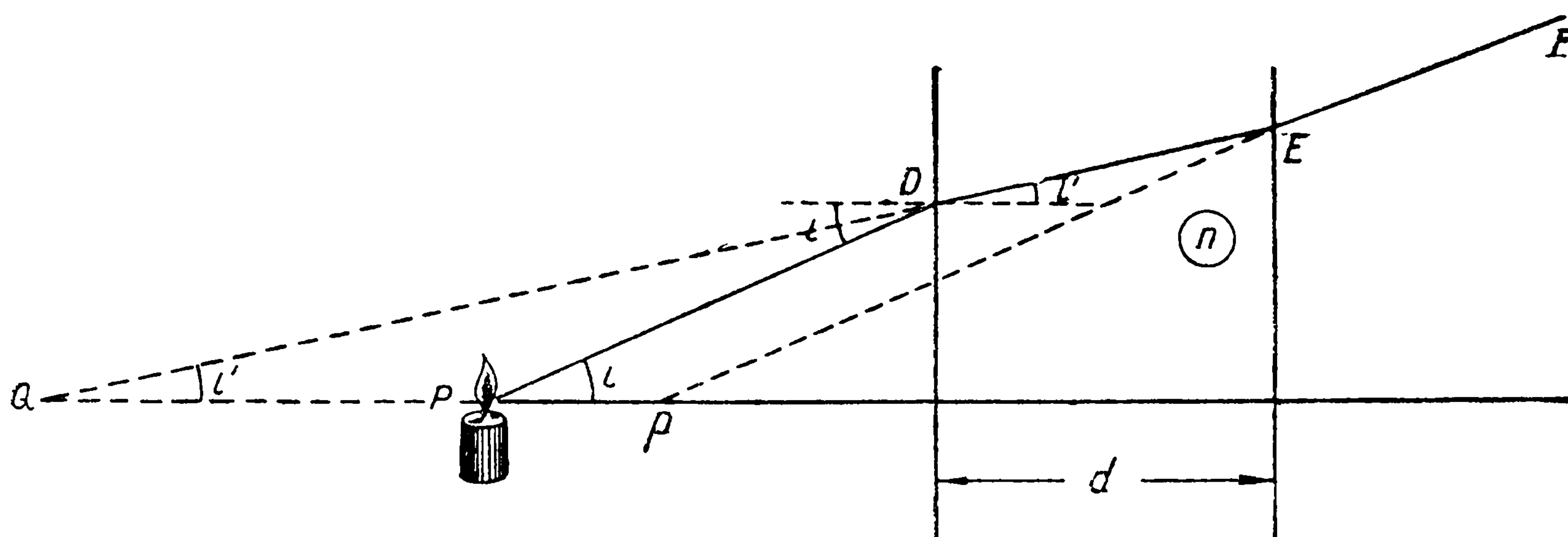


Рис. 3.

[16] Следует отметить исключительное значение для фотометрии формулируемой Бугером теоремы о независимости яркости предмета от расстояния наблюдения, когда действием промежуточной среды можно пренебречь. При доказательстве этой теоремы Бугер постулирует весьма важное положение о том, что восприятие яркости протяженного предмета определяется освещенностью его изображения на дне глаза.

[17] Пользуясь современной терминологией, слова „не изменяет сил света“ следует читать: „не изменяет яркостей“.

[18] Проследим ход вывода Бугера и степень его приближения. Обратимся к рис. 3, построенному в соответствии с фиг. 8 на стр. 32 трактата.

Обозначим через n показатель преломления вещества, из которого изготовлена пластинка, через d ее толщину, через i и i' — соответственно углы падения и преломления при падении луча на грань входа.

Исходим из соотношения, которым пользуется и Бугер:

$$\frac{DE}{Pp}=\frac{QD}{QP},$$

откуда следует, что вызываемое пластинкой смещение изображения относительно предмета равно:

$$Pp = DE\frac{QP}{QD}.$$

Из рис. 3 следует:

$$DE = \frac{d}{\cos i'}$$

$$\frac{QP}{QD} = \frac{\sin(i - i')}{\sin i},$$

откуда

$$Pp = d\frac{\sin(i - i')}{\sin i \cdot \cos i'} = d\left(1 - \frac{\operatorname{tg} i'}{\operatorname{tg} i}\right) = d\,\frac{n - \dfrac{\cos i}{\cos i'}}{n}.$$

При малых значениях углов i и i':

$$Pp = d\,\frac{n-1}{n}.$$

Бугер прямо приходит к этой формуле, приближенно полагая в ходе вывода:

$$DE \approx d$$

$$\frac{QP}{QD} \approx \frac{\sin i - \sin i'}{\sin i}.$$

[19] Под словами „интенсивность, или сила света“ следует понимать яркость.

Отметим, что Бугер формулирует здесь на примере рассматриваемого им частного случая весьма существенное положение о том, что яркость оптического изображения, если не учитывать потери света в оптической системе, равна яркости предмета.

[20] Слово „камера-обскура“ является переводом слов „chambre obscure“. Размеры камеры Бугера свыше двух метров. Вильде в своей „Истории оптики“ * трактовал камеру Бугера как затемненное помещение, а Q и P — как отверстия в ставнях.

Поясним рассуждения Бугера, иллюстрируя их рис. 4, схематически отображающим фиг. 9 на стр. 35 трактата.

В вертикальной стенке сделаны отверстия Q и P, причем площадь отверстия Q может быть изменяема.

* E. Wilde. Geschichte der Optik, t. II, Berlin, 1843.

На экране GH точка S освещена только рассеянным светом неба через отверстие Q, а точка R освещена только рассеянным светом неба, поступившим через отверстие P и отраженным от горизонтальной зеркальной поверхности O. Перегородка T символизирует экранирующие устройства.

Направления PO и QS выбираются параллельными, из чего вытекает, что углы падения лучей QS и OR на вертикальный экран GH равны между собой и длина QS равна сумме длин PO и OR. Эта длина, как это следует из приводимых Бугером цифр, по крайней мере в десять раз превышает размеры отверстий P и Q.

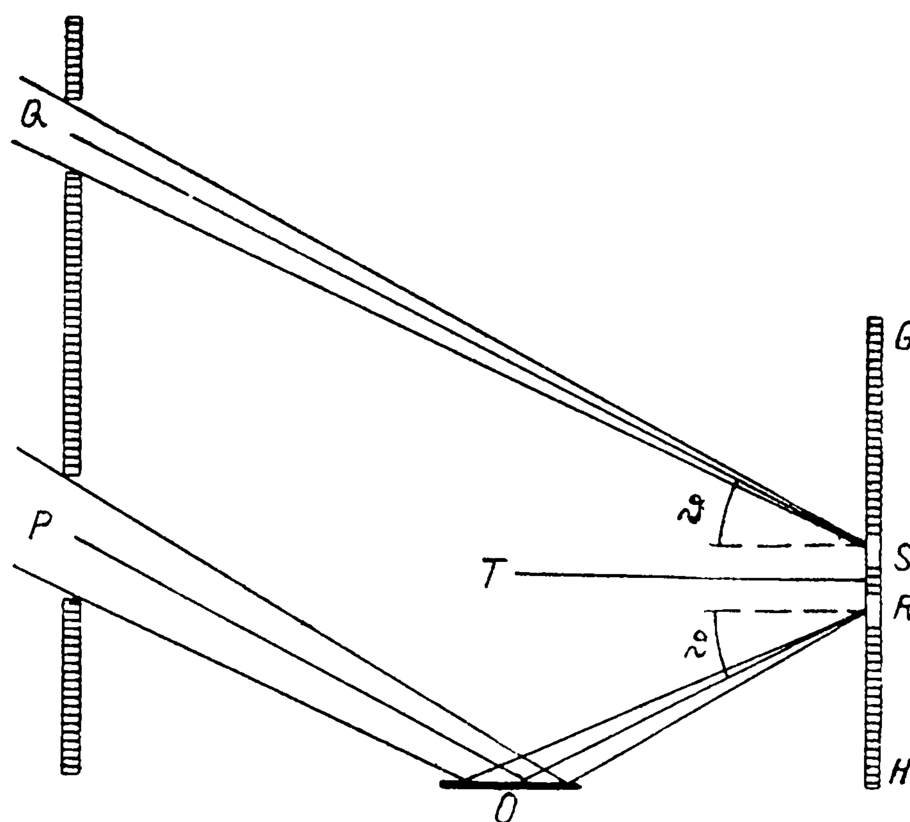


Рис. 4.

При этих условиях справедливо соотношение

$$\frac{E_S}{E_R} = \frac{\sigma_Q}{r\sigma_p},$$

где

E_S — освещенность экрана GH в точке S,

E_R — освещенность экрана GH в точке R,

σ_Q — площадь отверстия Q,

σ_P — площадь отверстия P,

r — коэффициент отражения от зеркальной поверхности O.

Если изменением соотношения площадей σ_Q и σ_P достигнуто равенство освещенностей, т. е.

$$E_S = E_R,$$

то

$$r = \frac{\sigma_Q}{\sigma_P}.$$

Интересно отметить, что родственный способ измерения коэффициента отражения зеркал использовал и Бюффон (Buffon, 1707—1788), описавший его в 1747 г. Он впускал солнечный свет через малые отверстия в затемненное помещение. Свет, прошедший через одно отверстие, непосредственно падал на белую стену, а свет, прошедший через другое отверстие, вначале падал на стеклянное зеркало и после отражения направлялся по соседству на ту же стену. Бюффон пришел к выводу, что при отражении терялась половина света, поскольку он должен был соединять пучки света, отраженные двумя зеркалами, чтобы добиться уравнения с прямым солнечным светом.

[21] Слово „изображение", когда идет речь о полях сравнения R и S, не следует понимать в его буквальном значении.

[22] Предложенное Бугером устройство может рассматриваться как прообраз относительных визуальных фотометров для сопоставления яркостей в двух направлениях.

[23] Историю микрометра и, в частности, упоминаемых Бугером работ Auzout и Picard'a можно найти во втором томе посвященного истории точных наук сочинения: J. Montucla. Histoire des Mathématiques. A Paris. An. VII.

[24] Гелиометр — измерительный прибор, применявшийся в астрономии для измерения малых углов на небесной сфере, например, угловых диаметров планет или угловых расстояний между звездами. Первоначально предназначался для измерения углового диаметра солнца (см.: J. Montucla. Histoire des Mathématiques, t. III).

Гелиометр устроен следующим образом. Объектив телескопа состоит из двух частей (он разрезан по диаметру или вырезана центральная часть), одна из которых может перемещаться при помощи микрометренного винта по отношению к другой. Смещение вызывает раздвоение изображения. Наведя, например, гелиометр на планету, можно вращением винта добиться касания обоих изображений, и деления на головке винта дадут угловой диаметр планеты.

Описание гелиометра опубликовано Бугером в Мемуарах Парижской Академии наук за 1748 г.*

Автором настоящих примечаний был обнаружен ряд указаний о гелиометре Бугера в письмах Леонарду Эйлеру от русского астронома академика

* De la mesure des diamètres des plus grandes planètes; description d'un nouvel instrument, héliomètre etc.

А. Н. Гришова и французского астронома академика Лаланда. Подлинники этих писем имеются в Архиве Академии Наук СССР (фонд 136, опись 2).

Лаланд в письме Эйлеру от 27 июня 1755 г. пишет: „Мы видели с удовлетворением новый английский инструмент, который состоит из разрезанного на две части объектива, помещенного в конце телескопа таким образом, что две скользящие одна относительно другой половины образуют два изображения, подходящих для измерения диаметра малых предметов".

„Г-н Бугер, который является первым изобретателем этой двойной зрительной трубы, предложил другую, весьма искусно придуманную...; он вырезает из середины объектива маленькую круглую часть, еще ее уменьшает, чтобы дать ей движение по отношению к другой... Кольцевая часть образует одно изображение, часть из середины — другое. Можно приближать и удалять эти два изображения для измерения величины предметов".

25 Интенсивностью света, выражающей бóльшую или меньшую сгущенность лучей, независимо от общего их количества, определяемого также размерами светящего тела, Бугер обозначает здесь то понятие, которое теперь именуют яркостью (см. примечание 4). Классическое, в старой фотометрии, определение яркости как величины, измеряемой частным от деления силы света на видимую поверхность светящего тела, дано Бугером в восьмой главе первой книги в весьма ясной форме.

26 Здесь Бугер, попутно, не прибегая даже к математическим выкладкам, показывает, что освещенность создаваемого объективом изображения удаленного предмета зависит только от яркости этого предмета (не зависит, если можно пренебречь потерями на пути, от расстояния до этого предмета), что она пропорциональна площади объектива и обратно пропорциональна квадрату фокусного его расстояния. Это положение в дальнейшем, особенно в связи с появлением и развитием фотографии, приобрело существенное значение и послужило основанием для введения понятия о светосиле объектива как отношении его диаметра к фокусному расстоянию.

27 Бугер обращает внимание читателя на линейность фотометрических соотношений, на прямую пропорциональность измененного светового потока (после отражения, прохождения через среду и т. п.) исходному световому потоку. Этого же вопроса касается Бугер в главе VIII второго раздела второй книги, когда пишет:

„...все эти изменения (света, — *А. Г.*) происходили не в одной и той же последовательности; однако, поскольку каждое из них может быть выражено отношением, то безразлично, в каком порядке они происходят: результат должен быть всегда одним и тем же".

Линейность фотометрических соотношений нарушается в случае люминесценции.

28 Здесь Бугер, не только в применении к зрительному восприятию, но и в предельно общем виде, формулирует тот психофизиологический закон, который в дальнейшем получил имя Вебера—Фёхнера.

29 Бугер говорит о следующем астрофотометрическом опыте, описанном Христианом Гюйгенсом в „Космотеоросе".* Желая оценить „удивительную и ужасаемопреславную широту мира", Гюйгенс сопоставляет доходящий до земли свет Солнца и звезд и определяет, в какой мере следовало бы уменьшить видимый диаметр Солнца или, иначе говоря, удалить его, чтобы солнечный свет стал сравним со светом, приходящим к земле от Сириуса — самой яркой из звезд.

Приведем ход рассуждения Гюйгенса и описание выполненного им опыта, следуя тексту трактата.

Каждая звезда есть солнце. Если принять, что она размером подобна Солнцу, то ее отдаление во столько раз больше расстояния от земли до Солнца, во сколько видимый ее диаметр меньше солнечного. Даже звезды первой величины столь малы, что и в зрительные трубы представляются светящими точками без ощутимых размеров.

При такого рода прямых наблюдениях измерить видимый диаметр звезд невозможно, и поэтому Гюйгенс решил настолько уменьшить видимый размер Солнца, чтобы от него к глазу приходило не больше света, чем от Сириуса (звезды в созвездии Большого Пса) или от других наиболее ярких звезд.

Для этой цели он взял полую трубу длиною 12 футов и прикрыл сверху ее отверстие очень тоненькой непрозрачной пластинкой, в середине которой проделал маленькую дырочку, размер которой не превышал двенадцатой доли линии или одной сто сорок четвертой дюйма (около 0.18 мм). Этим концом он направил трубу к Солнцу, а к другому приложил глаз. При этом он увидел такую часть Солнца, которая, по подсчету Гюйгенса, составляла ко всему его диаметру одну сто восемьдесят вторую долю. Эта часть Солнца оказалась еще много светлее, чем ночью Сириус.

Убедившись в том, что видимый диаметр Солнца нужно еще значительно уменьшить, Гюйгенс сделал это следующим образом. В просверленную пластинку, закрывавшую входное отверстие трубы, он вставил один из употреблявшихся им в микроскопах маленьких стеклянных шариков того же диаметра, что и отверстие. Итак, Гюйгенс использовал стеклянную линзу, имеющую форму шарика, диаметром около 0.18 мм. Такие шарики изготовлялись путем оплавления в пламени, и известно, что их Гюйгенс искусно делал для микроскопов.

---

* Christiani Hugenii. Κοσμοθέωρος sive de Terris Coelestibus earumque ornatu, conjecturae. Hagae, 1698.

Чтобы не мешал дневной свет при наблюдении, Гюйгенс закутал голову. При наблюдении в трубу, входное отверстие которой было закрыто отверстием с таким стеклянным шариком, свет Солнца был воспринят Гюйгенсом как не уступающий свету Сириуса. По правилам диоптрики Гюйгенс вычислил, что таким образом диаметр Солнца стал $\frac{1}{152}$ долей от прежней $\frac{1}{182}$ доли, которую он видел в маленькую дырочку. Так как 152, будучи умножено на 182, даст 27 664, то, следовательно, если в столь большое число раз сузить Солнце или, иначе говоря, его удалить, чтобы диаметр его стал $\frac{1}{27664}$ долей от того, который видим на небе, света останется не меньше, чем от Сириуса (числом значущих цифр, независимо от погрешности, в старину ученые, включая Гюйгенса, Бугера, Эйлера, себя не ограничивали).

Отсюда, по мнению Гюйгенса, можно судить об удалении звезд и о величине мироздания.

Итак, Гюйгенс пришел к тому экспериментальному выводу, что при уменьшении видимого диаметра Солнца примерно в 30 000 раз свет от него все же не уступал бы свету Сириуса. Отметим, что по современным данным Солнце создает на земле освещенность в 10^{10} раз бо́льшую, чем Сириус, и, следовательно, чтоб приравнять блеск Солнца блеску Сириуса, диаметр Солнца следовало бы уменьшить, примерно, в 100 000 раз.

Принятый Гюйгенсом метод фотометрической оценки путем сопоставления по памяти Бугер подвергнул в трактате справедливой критике, когда писал, что „мы можем судить непосредственно о живости двух ощущений лишь в том случае, когда они воздействуют на нас одновременно. Как иначе увериться в том, что столь деликатный орган, как глаз, находится неизменно в одном и том же состоянии, что он не более чувствителен к слабому впечатлению в одно время, чем в другое? И как вспомнить силу первого ощущения, испытывая второе, если их разделяет промежуток в несколько часов или несколько дней?

Таким образом, для того, чтобы преуспеть в этом определении, надлежало бы воспользоваться вспомогательным светом, которым можно было бы располагать в обоих наблюдениях и который служил бы общим источником сравнения".

Те же доводы изложены Бугером в его первой книге по фотометрии „Опыт о градации света" (1729).

Пожелания Бугера оказались осуществленными при проведении Волластоном опыта, аналогичного наблюдению Гюйгенса. В качестве вспомогательного, третьего источника Волластону служило изображение в зеркальном шарике пламени свечи, отодвигаемой на большее или меньшее рас-

стояние от шарика. Волластон, так же как и Гюйгенс, сопоставлял свет солнца и Сириуса.

Перечисленные работы непосредственно перекликаются с астрофотометрическими изысканиями М. В. Ломоносова. О них говорится в приложенном „Очерке жизни и трудов Пьера Бугера".

30 Сокращенный перевод брошюры Франсуа Мари на русский язык дан в „Приложениях". О значении предложенного Мари способа гашения говорится в „Очерке жизни и трудов Пьера Бугера".

31 Критика фотометрического способа Цельзия (A. Celsius, 1701—1744), автора носящей его имя температурной шкалы, содержится также в докладе Бугера „Sur les moyens de mesurer la lumière, avec quelques applications de ces moyens", опубликованном в 1757 г. в Мемуарах Парижской Академии. Выдержка из доклада Бугера приведена в статье „Очерк жизни и трудов Пьера Бугера".

Несколько обобщая фотометрический прием Цельзия, можно сказать, что он основывается на зависимости разрешающей силы глаза от яркости. Приводимое Бугером расчетное соотношение Цельзия соответствует предположению, что разрешающая сила глаза (величина, обратная предельному углу разрешения) изменяется пропорционально корню восьмой степени из яркости.

Если построить, по современным экспериментальным данным, пользуясь логарифмическими шкалами по осям координат, зависимость разрешающей силы глаза от яркости, то не получается прямая. Увеличение яркости сильнее сказывается на выигрыше в разрешающей силе при малых яркостях, чем при высоких.

При очень малых яркостях разрешающая сила глаза изменяется примерно пропорционально корню третьей степени из яркости фона, а при больших яркостях почти не меняется. Другими словами, если считать разрешающую силу глаза пропорциональной B^p, где B — яркость, то величина p с увеличением яркости уменьшается, изменяясь примерно от $\frac{1}{3}$ при малых яркостях почти до 0 при высоких яркостях. Величина p действительно близка к используемому Цельзием значению $\frac{1}{8}$, при яркостях фона в десятки „люксов на белом".

Говоря о Цельзии как об авторе работ по астрофотометрии, можно также вспомнить, что он совместно с Тулением (Tulenius) измерял блеск 64 ярких звезд фотометром, построенным на принципе гашения.

32 Трудности визуального фотометрирования разноцветных источников Бугер должен был воспринимать в полной мере, поскольку он, например, сопоставлял свет луны и солнца с наиболее распространенным в то время искусственным светом, светом от сальных свечей. Это значительно более

красный свет, весьма низкой цветовой температуры, резко отличающийся от света солнца или луны.

[33] Итак, Бугер принимает пороговое значение яркостного контраста равным $\frac{1}{60}-\frac{1}{80}$. При особо благоприятных условиях сравнения (одинаковая цветность и высокая яркость сравниваемх полей, резкая граница раздела между ними и т. д.) контрастная чувствительность глаза выше. Указанное Бугером значение хорошо соответствует условиям визуального фотометрирования в тех случаях, когда не ставится задачей достижение высокой точности.

[34] В рассуждениях Бугера, завершающих первую главу второго раздела первой книги, можно с должным основанием усмотреть первые предпосылки к построению теории адаптации.

[35] Следует иметь в виду, что под углом падения Бугер понимает, на что он несколько раз специально обращает внимание читателя трактата, угол между лучом и поверхностью, на которую он падает, то есть дополнение до 90° угла падения в современном понимании.

[36] Приводимые данные характеризуют качество зеркал начала XVIII в. Бугер нашел, что коэффициент отражения амальгамированного им стеклянного зеркала равен 63%, а „великолепно" полированного металлического зеркала — 56%. Бюффон в своем фотометрическом мемуаре 1747 г., где он описывает опыты по измерению коэффициента отражения стеклянного зеркала, приходит к выводу, что при отражении теряется около половины света.

[37] Приводимые Бугером цифры позволяют судить о прозрачности оптического стекла в XVIII в. Кусок стекла толщиной в 3 дюйма (8.1 см), привлекший, как пишет Бугер, его внимание своей особой прозрачностью, ослаблял свет вдвое, чему соответствует поглощение около 7—8% света на один сантиметр. Потери на поглощение в обычных сортах современного оптического стекла составляют доли одного процента на сантиметр, то есть примерно в десять раз меньше.

Представлялось бы весьма любопытным оценить прозрачность оконного и зеркального (оно же очкового) стекол времен Бугера. Во втором разделе третьей книги он принимает для типового оконного стекла пропускание равным $\frac{5}{7}$.

О малой прозрачности оконных и зеркальных стекол во времена Бугера свидетельствуют также результаты его измерений прозрачности стопы стекол. Бугер нашел, что 16 кусков обычного оконного стекла общей толщиной в 21 мм ($9\frac{1}{2}$ линий) ослабляли свет в 247 раз, а 6 кусков зеркального

(очкового) стекла общей толщиной в 26 мм ($11\frac{1}{2}$ линий) обладали в совокупности пропусканием 0.27.

Было бы интересно рассчитать по этим измеренным пропусканиям стопы стекол значения пропускания одного стекла. Это возможно в предположении, что полировка стекол была совершенной, но потребовало бы кропотливого расчета вследствие необходимости учета многократных отражений. Необходимые расчетные соотношения, определяющие пропускание света стопой поглощающих пластин, были даны Стоксом и развиты другими авторами.

О несовершенстве стекол, которыми пользовался Бугер, свидетельствует сопоставление полученных им данных со значениями пропускания света стопой из идеально прозрачного и полированного стекла.

Пропускание света стопой из k непоглощающих пластин с показателем преломления n равно:

$$t_k = \frac{1-\rho}{1+(2k-1)\rho},$$

где

$$\rho = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$$

есть коэффициент отражения на каждой поверхности раздела воздуха и стекла с показателем преломления n. Приняв $n = 1.5$ и соответственно $\rho = 0.04$, получаем, что 16 полированных пластин из непоглощающего свет материала пропустили бы 43% света, то есть ослабили бы его примерно в два с половиною раза, а не в двести пятьдесят раз, как стекла, которые испытывал Бугер.

38 Бугера следует считать одним из основоположников общей главы оптики и физики моря, получившей за последние годы наименование гидрооптики и посвященной изучению оптических свойств природной воды, закономерностям распределения в ней света и практическим задачам, связанным с распространением света в воде.

Произведем перерасчет данных Бугера о прозрачности морской воды, приведя их к принятой в настоящее время системе величин и единиц.

Вода, взятая в Круазике (родина Бугера, маленький городок на берегу Бискайского залива, расположенный у северной оконечности устья Луары), в толще 3.11 м (9 футов 7 дюймов) ослабляла свет, по данным Бугера, в отношении 14 к 5. Отсюда

$$\tau^{3.11} = e^{-3.11\alpha} = \frac{5}{14},$$

где τ — прозрачность на один метр, α — показатель ослабления. Расчет дает

$\tau = 0.72$ и $\alpha = 0.33 \frac{1}{\text{метр}}$. Это вода высокой прозрачности; в такой воде белый диск просматривается на глубине до 20 метров.

Вода открытого океана в тропической зоне столь прозрачная, что песчаный грунт просматривается до глубины 35 метров (100—120 футов), пропускает, как считает Бугер, в толще 3.25 метра (10 футов) около 65% света, т. е. ослабляет его в отношении 5 к 3 или 5 к $3^1/_2$, чему соответствует $\tau = 0.88$ и $\alpha = 0.13 \frac{1}{\text{метр}}$.

Приводимые Бугером значения нисколько не противоречат современным данным о прозрачности океанской и морской воды.*

39 В оригинале ошибочно вместо P указано Q.

40 Недостаточная разработанность системы понятий в фотометрии Бугера при данных наблюдениях, произведенных над отражением света от шероховатых поверхностей, послужила препятствием к выявлению существенных характеристик. Сущность описываемых Бугером измерений, повидимому, может быть представлена следующим образом. Измерялось для определенного частного случая отношение освещенности, создаваемой светом, отраженным от матовой поверхности, к освещенности самой этой поверхности. Принципиальная схема измерений предположительно могла бы быть иллюстрирована рис. 5. На этом рисунке P и Q сравниваемые по яркости глазом A поля сравнения фотометра. Поле P освещается светом от свечи K, отраженным от испытуемой пластинки (гипсового диска) T, а также тем добавочным паразитическим светом, который не удалось устранить. Поле Q освещается светом от той же свечи, но отраженным от зеркала M. Равенство яркостей достигается перемещением этого зеркала.

В начале гипсовый диск T убирался, и тогда для достижения равновесия зеркало приходилось ставить в некоторое положение M_1, при котором

$$KM_1 = 60 \text{ дм.}; \quad M_1 Q = 54 \frac{1}{2} \text{ дм.}$$

Затем гипсовый диск ставился на место, и для сохранения равенства освещенностей в P и Q зеркало приходилось приближать, ставя в новое положение M_2, при котором

$$KM_2 = 36 \text{ дм.}, \quad M_2 Q = 30 \frac{1}{2} \text{ дм.}$$

---

* См.: В. Шулейкин. Физика моря. Изд. Академии Наук СССР, 1941; В. Березкин, А. Гершун, Ю. Янишевский. Прозрачность и цвет моря. 1940.

Если обозначить через I силу света свечи, а через r — коэффициент отражения заркала ($r = 0.55$), то, следовательно, освещенность в точке P, создаваемая диском T, равна:

$$E_P = \frac{rI}{(KM_2 + M_2 Q)^2} - \frac{rI}{(KM_1 + M_1 Q)^2} =$$

$$= Ir\left(\frac{1}{66\frac{1}{2}^2} - \frac{1}{114\frac{1}{2}^2}\right) = Ir\left(\frac{1}{4422\frac{1}{4}} - \frac{1}{13110\frac{1}{4}}\right) =$$

$$= Ir\left(\frac{227}{1\,000\,000} - \frac{76}{1\,000\,000}\right) = Ir\frac{151}{1\,000\,000} =$$

$$= I\frac{55}{100}\cdot\frac{151}{1\,000\,000} = I\frac{8305}{100\,000\,000} = \frac{I}{12041}.$$

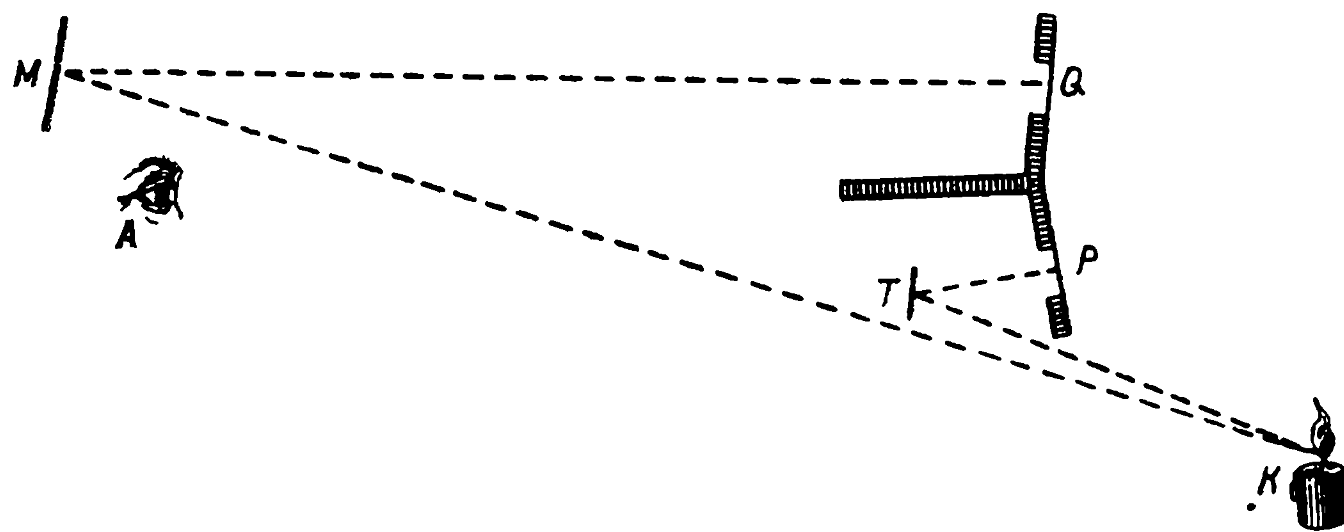


Рис. 5.

Освещенность падающими по нормали лучами в точке T, где расположен гипсовый диск, поскольку

$$KT = 9 \text{ дм.},$$

равна:

$$E_T = \frac{I}{KT^2} = \frac{I}{81}.$$

Следовательно,

$$\frac{E_P}{E_T} = \frac{1}{12\,041} : \frac{1}{81} = \frac{1}{149}.$$

Дальнейшего толкования этого экспериментально полученного результата Бугер не дал.

Отношение $\frac{E_P}{E_T}$ с достаточным приближением можно считать равным произведению коэффициента отражения света гипсовым диском на квадрат отношения радиуса диска $\left(\frac{1}{2}\text{ дм.}\right)$ к расстоянию TP (3 дм.) Подстановка числовых значений с учетом того, что, по словам Бугера, „гипсовый диск имел превосходную белизну“ приводит к значению отношения $\frac{E_P}{E_T}$ в несколько раз большему, чем полученное Бугером.

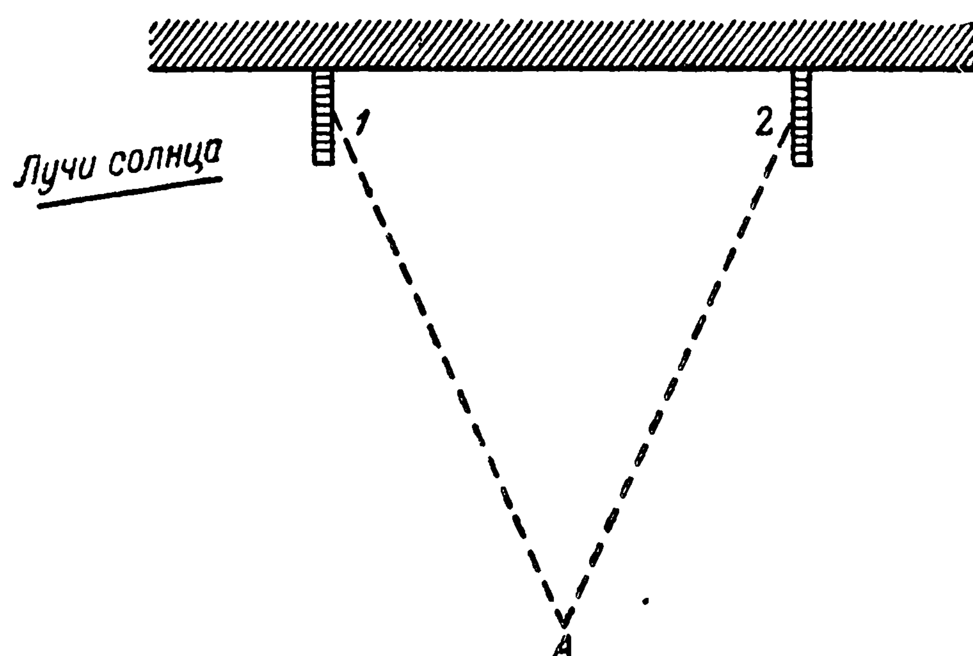


Рис. 6.

[41] Пропуски числовых значений во втором разделе первой книги обусловлены смертью Бугера, не позволившей ему провести опыты по уточнению этих значений (см. „Предуведомление“ де-ла-Кайля в начале трактата).

[42] Результаты измерений Бугера хорошо соответствуют современным данным о распределении яркости по небу.*

[43] Можно предполагать, что измерение производилось согласно принципиальной схеме, иллюстрируемой рис. 6, где 1 и 2 — дощечки, освещенности которых сравниваются, а A — местоположение наблюдателя.

[44] Можно предполагать, что измерение производилось согласно принципиальной схеме, иллюстрируемой рис. 7, где 1 и 2 — дощечки, освещенности которых сравниваются, а A — местоположение наблюдателя.

[45] В книге „Опыт о градации света“, изданной в 1729 г., указывается, что свет от луны „воспринимался перпендикулярно“, то есть измерялась освещенность от лучей луны, падающих по перпендикуляру к освещаемой поверхности.

[46] В первом приближении освещенность от перпендикулярно падающих лучей луны может быть вычислена по формуле

$$E = E_0\, p^{m(h)},$$

* См.: Н. Болдырев. О распределении яркости по небу. Журнал „Светотехника“, 1935, № 6.

где E_0 — освещенность перпендикулярно падающими лучами луны за пределами земной атмосферы, h — высота луны, $m(h)$ — соответствующее значение функции, называемой воздушной массой (за единицу принимается воздушная масса по вертикали), p — астрономический коэффициент прозрачности, равный коэффициенту пропускания всей толщи атмосферы для луча, идущего от зенита.

Это соотношение и по настоящее время широко используется в астрономии и носит название закона или формулы Бугера.

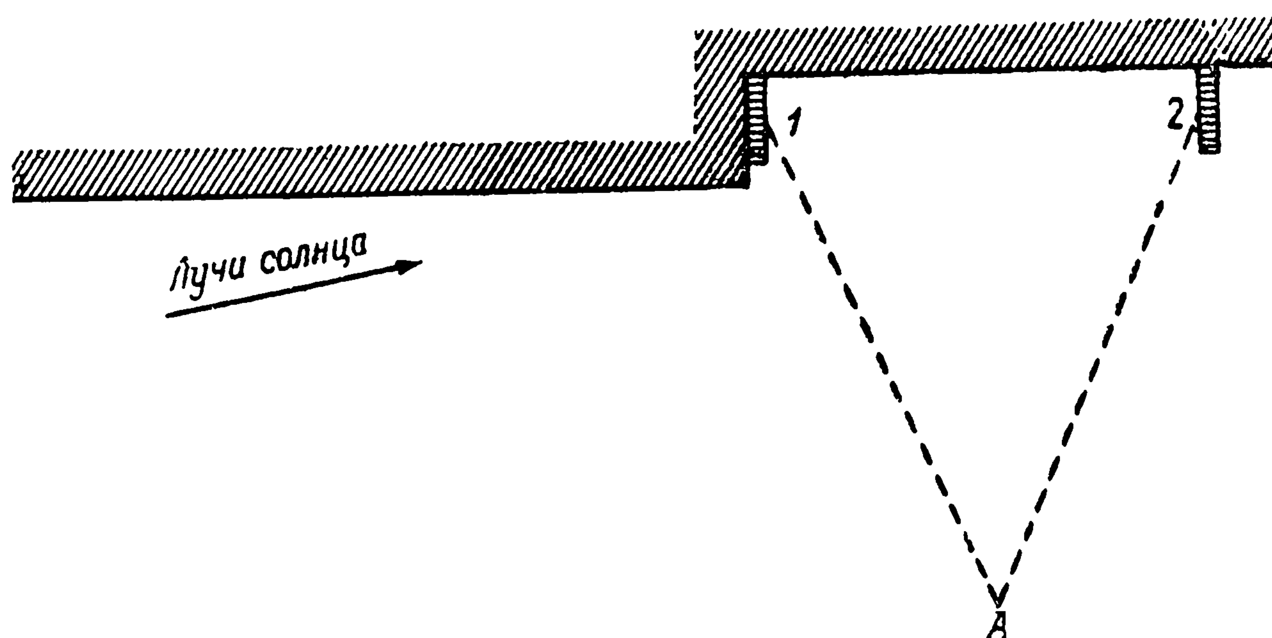


Рис. 7.

В первом приближении для не слишком малых значений h можно считать, что $m(h) = \operatorname{cosec} h$. Более точные значения функции $m(h)$ приводятся в руководствах по метеорологии и были впервые даны Бугером (в третьей книге трактата). Приведем значения функции $m(h)$ для тех высот луны, при которых производил измерения Бугер:

h	$m(h)$
$\frac{1^\circ}{4}$	33
$19^\circ 16'$	3.01
$66^\circ 11'$	1.09

Разность воздушных масс при высотах луны $19^\circ 16'$ и $66^\circ 11'$ есть 1.92. Опыт Бугера позволяет рассчитать значение p, исходя из формулы

$$p^{1.92} = \frac{1681}{2500},$$

что дает $p = 0.81$.

Аналогичный расчет, исходя из того, что заходящая луна $\left(h=\frac{1}{4}^{\circ}\right)$ создает в 2000 раз меньшую освещенность, чем луна при возвышении 66°11′, привел бы к значению $p = 0.79$.

[47] В главах IX, X в XI второго раздела первой книги трактата Бугер излагает свои первые фотометрические работы, выполненные им в молодости, за тридцать лет до издания трактата, и посвященные сравнению света от солнца и луны со светом свечей и оценке потерь света при прохождении через атмосферу при различных возвышениях светил.

Эти работы возникли в результате желания Бугера решить выдвинутую акад. Мераном и казавшуюся современникам неразрешимой задачу, сопоставления света от солнца в зимнее и летнее солнцестояние.

Об истории и значении работ Бугера по измерению освещенности от солнца и луны, равно как и прозрачности атмосферы, рассказывается в „Очерке жизни и трудов Пьера Бугера“.

[48] Бугер принимает здесь высоту однородной атмосферы равной 3911 туазам или 7.63 км.

[49] Данные этого опыта Бугера были использованы Эйлером для расчета отношения яркости солнца к яркости свечи.* Эйлер, принимая свечу за светящийся шар диаметром $\frac{1}{2}$ дюйма, показал, что яркость солнца больше чем в 100 000 раз превышает яркость свечи. Расчет Эйлера приведен в приложенной статье о Бугере.

[50] Опыты Бугера по сопоставлению света от солнца и луны со светом свечей позволяют, рассматривая эти светила как „вторичные световые эталоны“, примерно оценить силу света тех свечей, которыми пользовался Бугер.

Эта мысль была высказана Ш. Фабри в его докладе „О связи между астрономической и практической фотометрией“, который он сделал в 1924 г. (Transactions Illuminating Engineering Society, vol. XX, N 1, January 1925).

Фабри говорил следующее:

„Интересно отметить с исторической точки зрения, что с числами, данными Бугером, мы в состоянии рассчитать силу света сальной свечи..., используя луну как вторичный эталон... Расчеты показывают, что сальная свеча имела много бо́льшую силу света, чем Вы предполагаете. Сила света была около 15 международных свечей; возможно, что уровень осве-

---

* Euler. Reflexions sur les divers degrés de lumiére du Soleil et des autres corps celestes. Histoire de l'Academie Royale des sciences et Belles Lettres. Anneé MDCCL. Berlin, 1752.

щения снизился в начале девятнадцатого столетия, когда сальная свеча исчезла из соображений удобства, уступив место современным свечам".

Как было уже отмечено в конце четвертого примечания, Бугер использовал свечи двух типов, называя их „bougie" (в переводе „свеча", предположительно восковая свеча) и „chandelle" (в переводе „сальная свеча"). Первая из них служила обычным его источником сравнения, и лишь при двух опытах он пользовался второй.

Используя современные данные об освещенности от перпендикулярно падающих лучей солнца и луны,* можно оценить вероятное значение силы света эталонов Бугера. Из обработки данных, содержащихся в описании опытов в главе IX второго раздела первой книги трактата, вытекает, что сила света свечи („bougie") примерно равнялась одной свече. Характеристики данных опыта, описанного в главе III второго раздела первой книги трактата, действительно приводят к очень большому значению силы света сальной свечи („chandelle"), а именно, примерно, десяти свечам. Само собой разумеется, что считать эти соотношения сколь-либо достоверными нельзя.

51 По современным данным, * отношение света от солнца к свету от полной луны (при средних ее расстояниях до земли) больше, чем значение 300 000, полученное Бугером, которое он сам признавал весьма приближенным.

Отметим, что после Бугера для этого отношения были получены значения: 801 000 в 1799 г. Волластоном и 471 000 в 1860 г. Бондом.

Освещенность за пределами атмосферы от перпендикулярно падающих лучей солнца (световая солнечная постоянная) равна 125 000 люкс, а от полной луны при средних расстояниях до земли (лунная постоянная) около 0.29 люкса. Их отношение несколько превышает 400 000.

52 Повидимому, опечатка в оригинале. Вместо „диаметра" следует читать „радиуса".

53 Линейные и угловые координаты сравнивавшихся Бугером по яркости точек D и E на поверхности солнца иллюстрируются рис. 8.

54 Глава, завершающая первую книгу и посвященная сравнительному измерению яркости солнечного диска в центре и в точке у края, является одним из самых замечательных мест трактата Бугера.

Бугер экспериментально показал, что яркость солнечного диска падает от центра к краю или, иначе говоря, что яркость лучей, испускаемых наклонно, меньше, чем для лучей, исходящих по нормали к поверхности.

---

* В. Шаронов. Таблицы для расчета природной освещенности и видимости. Изд. Академии Наук СССР, 1945.

Для точки, отстоящей от центра солнечного диска на $\frac{3}{4}$ радиуса, чему соответствует угол 48° 35′ между лучом и нормалью к поверхности, по измерениям Бугера яркость оказалась равной $\frac{35}{43}=0.73$ максимального значения.

По современным данным для данной точки солнца яркость равна 0.8 от значения для центра солнечного диска. На установленный Бугером факт падения яркости к краю солнечного диска вначале не обратили внимания, потом к нему начали относиться с недоверием.

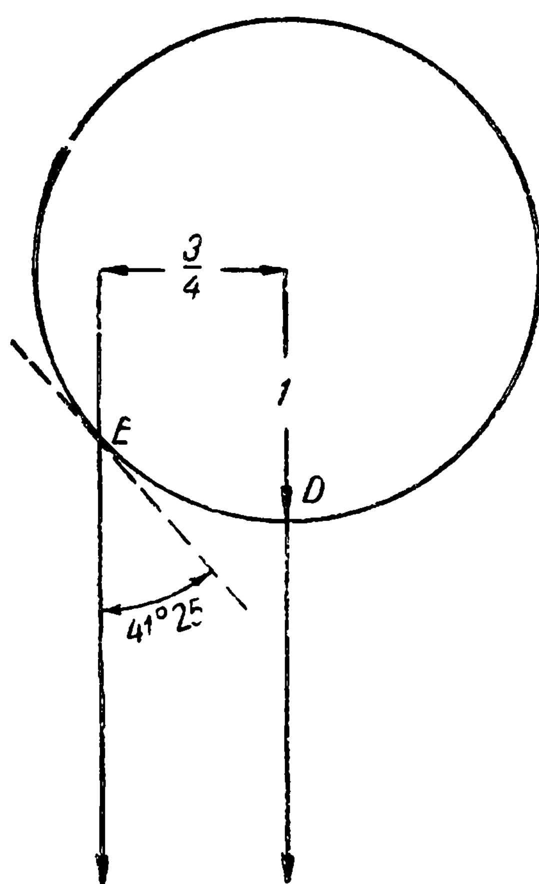


Рис. 8.

Ламберт в своей знаменитой книге „Фотометрия“, вышедшей в 1760 г., то есть в том же году, что и большой трактат Бугера, пишет: „Ведь никто не отважится сомневаться, что глазу, вооруженному гелиоскопом, вся поверхность солнца кажется равносветлой“. Напомним, что под наименованием machina helioscopica немецкий астроном Христофор Шейнер (Scheiner, 1575—1650), известный своими работами по наблюдению солнечных пятен, описал в 1626 г. такое видоизменение телескопа, при котором изображение солнца отбрасывается на белый экран в затемненном помещении.

Гершель в своем превосходном курсе оптики * в 1327 г. писал о данных измерения Бугера следующее:

„Результат столь необычайный и столь несомненно несогласный со всем, что мы знаем о строении солнца и о том, как испускается свет с его поверхности, что он должен был бы быть подтвержден весьма тщательным исследованием“.

Вопрос о зависимости яркости от направления излучения и, в частности, о распределении яркости по диску солнца имел большое значение для установления основ фотометрической науки. Особо поучительно сопоставление изысканий в этом направлении Бугера, Эйлера и Ламберта. История этого вопроса является блестящим свидетельством гениальной физической интуиции Бугера, ей посвящено несколько страниц в приложенном „Очерке жизни и трудов Пьера Бугера“.

---

* Hershel. On the theory of Light.

Примечания ко второй книге

[55] Это положение можно рассматривать как утверждение существенной в оптике теоремы о том, что яркость зеркально отраженного луча, при отсутствии потери света, равна яркости падающего луча (см. также примечание 19).

[56] Напомним, что термин „сила света“ следует трактовать как относящийся к освещенности (см. примечание 4).

[57] Нельзя требовать, чтобы современный читатель знал и тем более помнил то соотношение из теории отражательной каустики от сферы, которое Бугер приводит без вывода, отмечая, что его читатели это соотношение знают. Вопросы теории каустик, широко известные ученым современникам Бугера, давно потеряли интерес научной новизны, и знают их в тонкостях теперь разве лишь специалисты в области геометрической оптики. Поэтому, чтобы не утруждать читателя перевода необходимостью самому делать выкладки или искать их в литературе, приведем краткий вывод используемого Бугером соотношения.

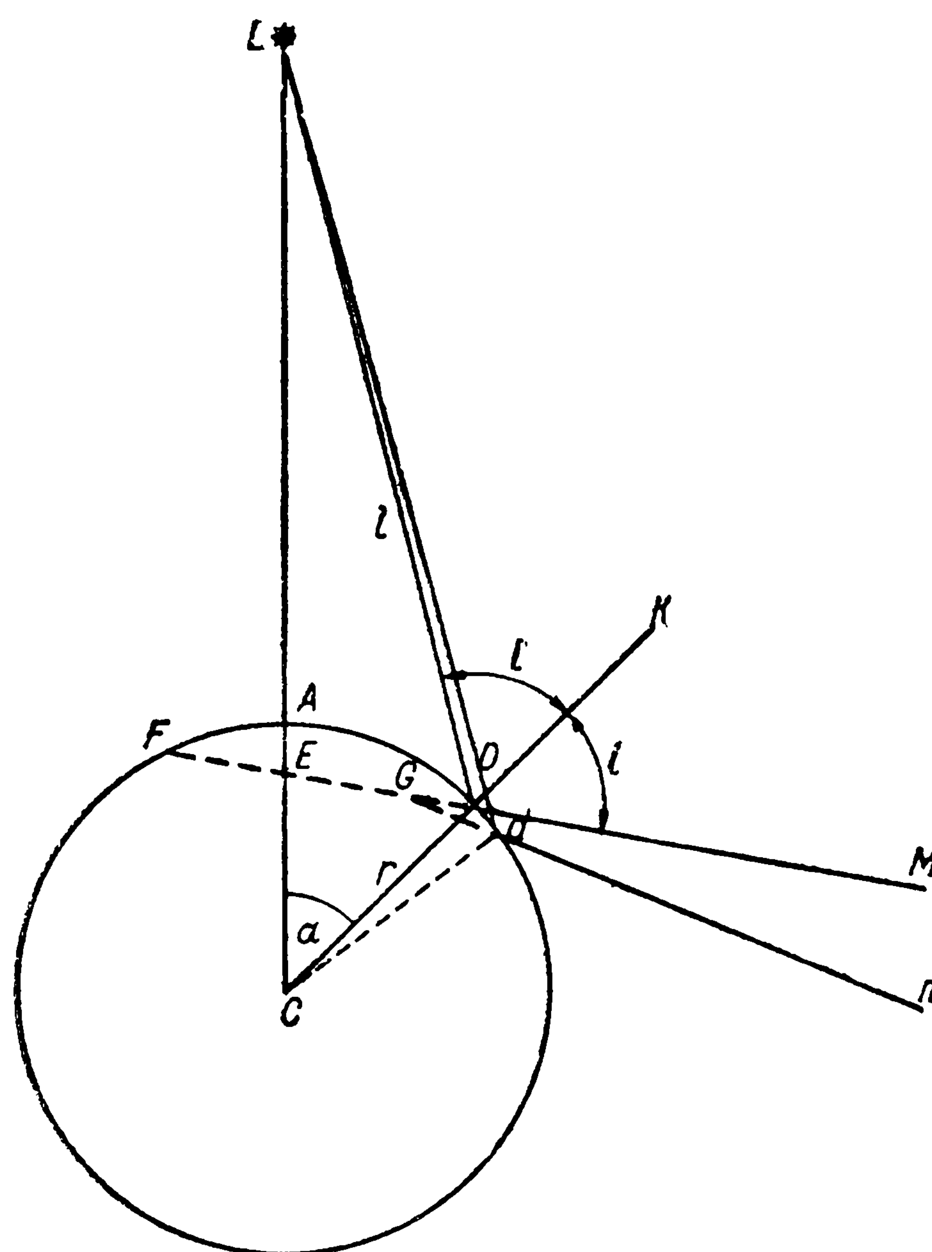


Рис. 9.

Обратимся к рис. 9, построенному на основании фиг. 14 на стр. 86 трактата. Рассматривается отражение света зеркальной сферой с центром в точке C. На некоторую точку D этой сферы падает луч LD от точечного источника L; луч отражается по направлению DM. Выделим элемент поверхности сферы около точки D (например ограниченный двумя бесконечно близкими плраллелями и двумя бесконечно близкими меридианами). Гомоцентрический пучок света, падающий от точки L на этот элемент зеркальной сферы, после отражения становится астигматическим. В меридиональном сечении, совпадающем с плоскостью чертежа, он будет казаться исходящим из точки G. Так, например, в этой точке пересекутся лучи,

отраженные в бесконечно близких точках D и d, лежащих на одном меридиане. В сагиттальном сечении, перпендикулярном плоскости чертежа, отраженный пучок лучей будет казаться исходящим из точки E. Здесь пересекаются лучи, отраженные в точках сферы, лежащих с точкой D на одной параллели.

Задача заключается в определении положения точек G и E, которые можно рассматривать как изображения точки L; расстояние GE есть астигматическая разность.

Введем обозначения:

$l = LD$ — расстояние до источника света,

$r = CD$ — радиус отражающей сферы,

$i = \angle LDK = \angle MDK$ — угол падения и отражения,

$\alpha = \angle ACD$ — зенитное расстояние точки D.

Из рассмотрения треугольников ECD и GDd (бесконечно малую дугу Dd можно считать отрезком прямой) следует:

$$\frac{r}{DE} = \frac{\sin(i+\alpha)}{\sin\alpha},$$

$$\frac{r \cdot d\alpha}{DG} = \frac{di + d\alpha}{\cos i}.$$

Воспользовавшись соотношением

$$\frac{\sin(i-\alpha)}{\sin i} = \frac{r}{CL} = \text{постоянная}$$

$$\frac{di}{d\alpha} = 1 + \frac{r}{l}\cos i,$$

$$\frac{\sin(i-\alpha)}{\sin\alpha} = \frac{r}{l},$$

получаем известные формулы:

$$\frac{1}{DG} = \frac{1}{l} + \frac{2}{r\cos i},$$

$$\frac{1}{DE} = \frac{1}{l} + \frac{2\cos i}{r}.$$

Поскольку хорда $DF = 2r\cos i$, то

$$\frac{1}{DG} = \frac{1}{LD} + \frac{4}{DF}$$

или

$$DG = \frac{\frac{1}{4} DF \cdot LD}{LD + \frac{1}{4} DF}.$$

Это и есть та формула, из которой исходит Бугер.

58 В оригинале опечатка: вместо $O\delta\mu$ набрано Odm. Опечатка при переводе исправлена.

59 Tacquet, Barrow, Smith.

60 Страница 79 в русском издании „Лекций по оптике“ Ньютона в переводе акад. С. И. Вавилова. (Изд. Академии Наук СССР, 1940).

61 Представление о мере множества лучей, которым пользуется Бугер, соответствует духу современной математики и используется сейчас в уточненной форме в литературе по теоретической фотометрии.*

62 Бугер формулирует существенную оптическую теорему о том, что освещенность, создаваемая астигматическим пучком света, обратно пропорциональна произведению расстояний до обоих фокусов. Положение об обратной пропорциональности освещенности квадрату расстояния до точечного источника света может трактоваться как частный случай этой теоремы.

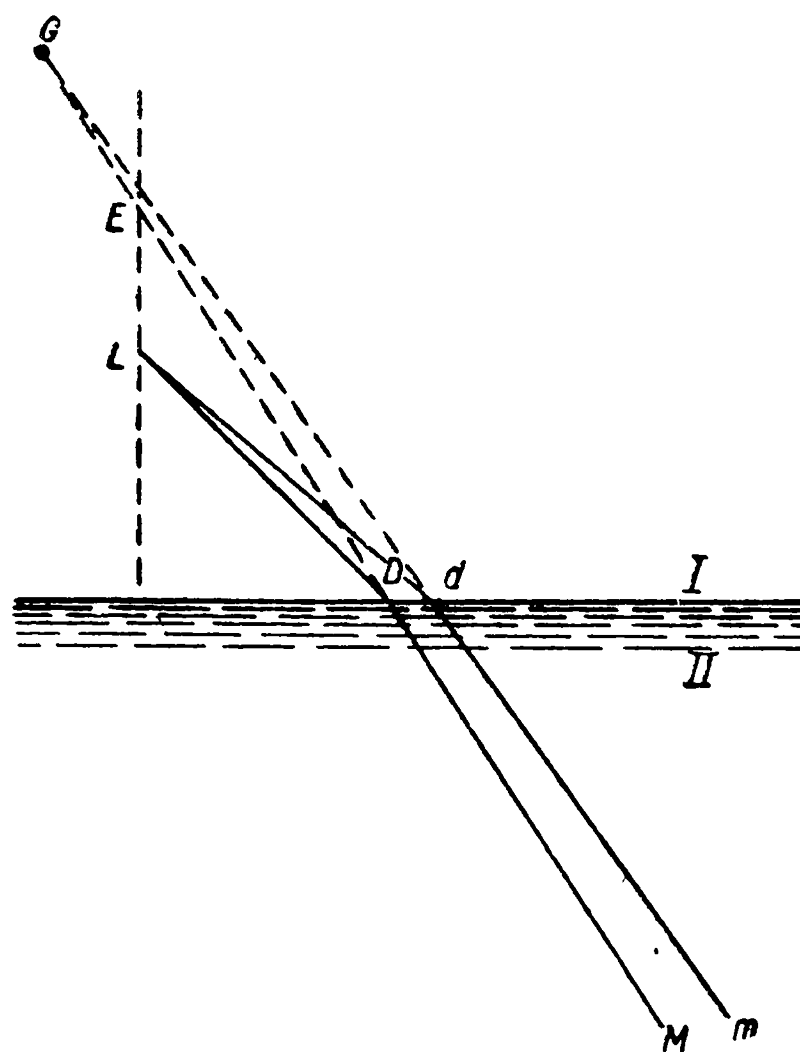


Рис. 10.

Фотометрия астигматического пучка на находит в настоящее время должного отражения в курсах оптики, хотя и имеет существенное значение при рассмотрении ряда вопросов. Покажем это на примере, иллюстрируемом рис. 10, изображающим преломление лучей от источника света L, расположенного в среде I, при переходе через плоскую границу раздела в среду II. Обозначения на этом рисунке выбраны в соответствии с использованными Бугером в фиг. 15 на стр. 89 трактата. Освещенность в некоторой точке *M* вто-

---

* См., например: А. Гершун. Мера множества лучей. Труды Государственного Оптического института, том 14, выпуск 112—120, 1941.

рой среды при перемещении этой точки вдоль преломленного луча DM будет изменяться обратно пропорционально произведению расстояний MG и ME, где G — изображение точки L в меридиональных лучах, а E — в сагиттальных.

[63] Примем, как это делает Бугер, силу света (в современном толковании этого понятия) источника L за единицу и обозначим через I' силу света его изображения в зеркальной сфере (рис. 9).

Освещенность отраженными лучами будет изменяться обратно пропорционально произведению расстояний до точек E и G, в которых расположены сагиттальное и меридиональное изображения. Величину I' можно найти, сопоставив выражения для освещенности в точке D:

$$\frac{1}{LD^2}=\frac{I'}{DE\cdot DG},$$

откуда

$$I'=\frac{DE\cdot DG}{LD^2}.$$

Освещенность E' в точке M, создаваемая перпендикулярно падающими отраженными от зеркальной сферы лучами, будет равна:

$$E'=\frac{I'}{ME\cdot MG}=\frac{DE\cdot DG}{LD^2\cdot ME\cdot MG}.$$

Величину E' можно, исходя из этой формулы, выразить через радиус сферы, расстояние до источника и угол падения. *

[64] Фиг. 14 трактата удобно сопоставить с рис. 11 „Комментария".

[65] В оригинале вкралась затрудняющая понимание текста опечатка, а именно: вместо „Произведение DE на DG" набрано: „Произведение DE на DF". Опечатка при переводе исправлена.

[66] При пользовании современной терминологией эта теорема Бугера может быть формулирована следующим образом:

Зеркальная сфера, освещенная параллельным пучком, имеет по всем направлениям одинаковую силу света, которая, при условии идеального отражения, равна:

$$I'=\frac{E\cdot r^2}{4},$$

где E — освещенность перпендикулярно падающими прямыми лучами в месте нахождения сферы, а r — радиус этой сферы.

Эту теорему проще всего непосредственно вывести следующим образом (рис. 11). Выделим пояс на сфере, ограниченный параллелями, проходящими

через точку D и через бесконечно близкую ей точку d. На этот пояс упадет и отразится от него световой поток

$$dF' = E2\pi r^2 \sin i \cos i \, di.$$

Этот поток будет распределен в телесном угле:

$$d\omega' = 2\pi \sin 2i \; d(2i) = 8\pi \sin i \cos i di.$$

Рассматривая зеркальную сферу как вторичный источник света, получаем, что соответствующее значение силы света будет равно

$$I' = \frac{dF'}{d\omega'} = \frac{Er^2}{4}.$$

Полный световой поток, отраженный сферой

$$F' = 4\pi I' = E \cdot \pi r^2,$$

получается равным, как это и должно быть световому потоку, падающему на сферу.

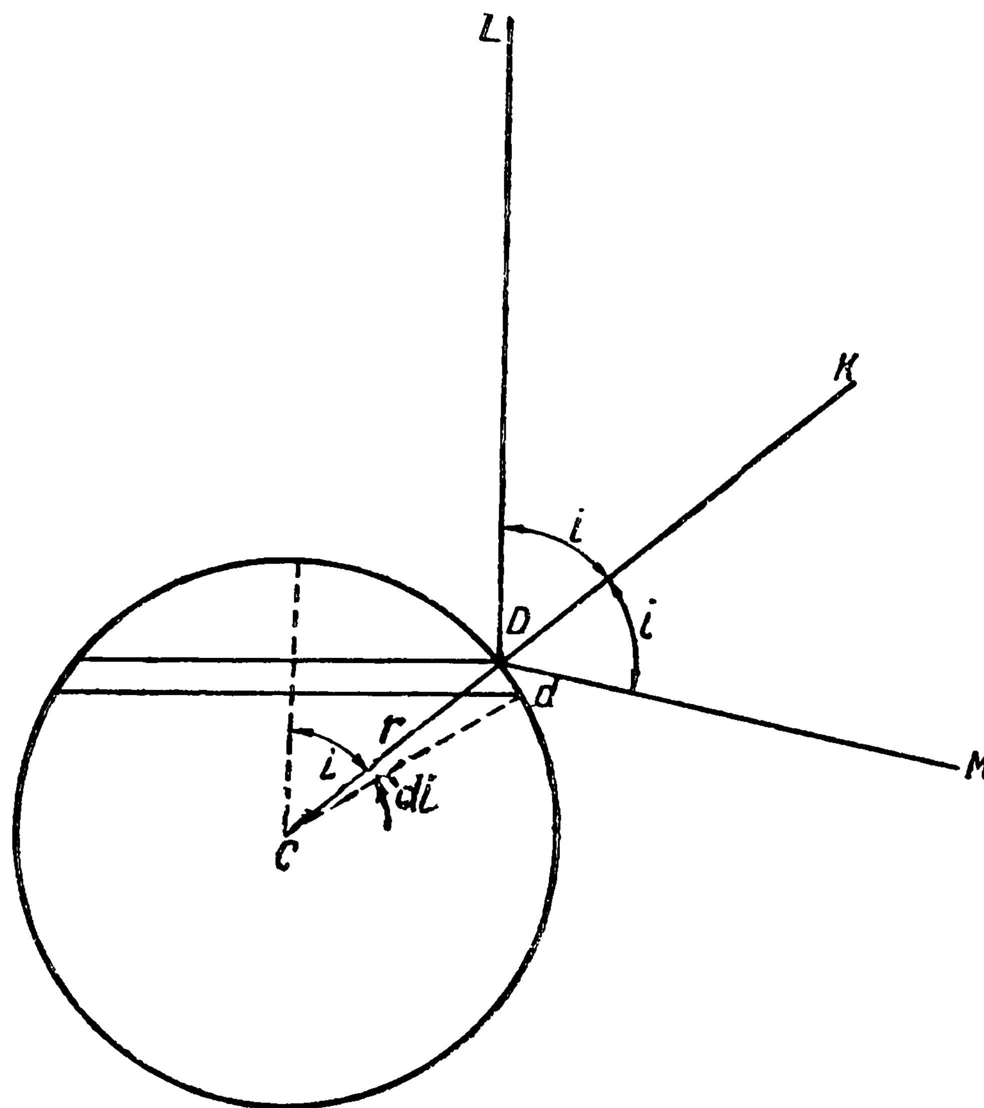


Рис. 11.

67 Представление Бугера о матовых поверхностях, как сочетании разноориентированных зеркальных элементов, подробно развивается им в третьем и четвертом разделах второй книги трактата. Оно не потеряло своего значения и по настоящее время. Несмотря на большое число выполненных исследований, и сейчас нет сколь-либо совершенных, хотя бы и феноменологических, теорий, позволяющих истолковывать и предсказывать пространственное распределение лучистой энергии, отраженной от шероховатых поверхностей, неровности которых сопоставимы по размеру с длиной волны или ее превышают. Такие теории нужны как в оптике, так и при рассмотрении закономерностей отражения радиоволн.

Авторы современных работ обычно исходят, ссылаясь на Бугера, из того, что шероховатые, матовые поверхности можно рассматривать состоящими

из большого числа малых гладких поверхностей, наклоненных под всевозможными углами к макроповерхности. Шероховатую поверхность рассматривают, так же, как это делал и Бугер, как совокупность разноориентированных микроэлементов, от каждого из которых происходит отражение по законам геометрической оптики. При этом задаются тем или иным распределением нормалей к микроэлементам, например соответствующим Гауссовскому, и той или иной закономерностью для зависимости коэффициента отражения от угла падения, например определяемой формулами Френеля. При построении такой модели большую трудность вызывает учет взаимного затенения отражающих элементов и еще большую трудность — необходимость согласования ее с волновой природой света, то есть явлениями диффракции и интерференции.

Вопрос о теории Бугера отражения света от матовых поверхностей рассматривается в приложенном „Очерке жизни и трудов Пьера Бугера".

[68] Подобного рода задачи расчета освещенности от больших светящих поверхностей разных форм путем интегрирования по поверхности были впервые поставлены и разрешены с должной общностью и строгостью Ламбертом.*

[69] Положение соединения соответствует новолунию, противостояния — полнолунию.

[70] Искомое соотношение, в соответствии с выведенной Бугером теоремой, должно равняться $\frac{1}{4}\frac{r^2}{L^2}$, где r — радиус луны, а L — среднее расстояние до нее. Подставляя, в соответствии с современными данными, $r = 1740$ км и $L = 384\,000$ км, получаем для искомой величины $1:196\,000$.

[71] Бугер сопоставляет две гипотезы об отражении света Луною, согласно одной из которых Луна подобна сферическому зеркалу и согласно другой имеет шероховатую поверхность. Подробное и увлекательное обсуждение этих двух точек зрения можно найти в „Диалоге о двух главнейших системах мира — птоломеевой и коперниковой" Галилео Галилея, вышедшем в 1632 г., т. е. примерно за сто лет до книг Бугера.**

Три собеседника — Сальвиати, Сагредо и Симпличио — (глава „День первый") особое внимание уделили тем вопросам, которые теперь относят к астрофотометрии.

Галилей устами Сальвиати, сторонника системы Коперника, утверждает, что Луна не идеальная зеркальная сфера, а сфера с еще более неровной,

* J. H. Lambert. Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae, 1760.

** Галилео Галилей. Диалог о двух главнейших системах мира — птоломеевой и коперниковой. ОГИЗ, 1948.

чем у земли, поверхностью. Диск Луны в полнолуние воспринимается равноярким, поскольку солнцем освещены склоны и скаты гор на Луне.

Инструментальные измерения Бугера подтвердили утверждение Галилея об отсутствии падения яркости от центра к краю диска Луны, хотя лучи солнца освещают поверхность лунной сферы в центре отвесно, а по краям скользящим пучком. Осталось в силе и объяснение этого явления тем, что элементы поверхности Луны по-разному ориентированы по отношению к макроповерхности.

Существенные успехи в фотометрическом изучении поверхностей планет и их спутников (в частности Луны) и в толковании полученных результатов достигнуты советскими астрономами Н. П. Барабашевым, А. В. Марковым, Г. А. Тиховым, В. В. Шароновым и другими.

72 Море влажности.

73 Arcueil — место сооружения знаменитых водопроводов около Парижа.

74 Косинусом-верзусом угла (или обращенным косинусом угла) в старой математической литературе называли разность между единицей и синусом этого угла. Следовательно:

$$z = \text{covers}\,\alpha = 1 - \sin\alpha = 1 - \cos i,$$

где α — угол между падающим лучом и поверхностью, а i — его дополнение до прямого угла, то есть угол падения в современном понимании.

75 Интересно оценить, насколько правильно измерил Бугер значения коэффициента отражения ρ света поверхностью воды и насколько удачно установлена им эмпирическая формула для зависимости значения ρ от угла падения i (в современном понимании этой величины). Сопоставим значения, вычисленные по формуле Бугера

$$\rho = \frac{1}{55} + \frac{1}{3}(1 - \cos i)^3 + \frac{2}{5}(1 - \cos i)^6$$

и по формуле Френеля

$$\rho = \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} + \frac{\text{tg}^2(i - i')}{\text{tg}^2(i + i')}\right],$$

где

$$\sin i = n \sin i' = \frac{4}{3}\sin i'.$$

Результат сопоставления приведен в таблице на стр. 434 и на рис. 12.

Сплошная кривая на рис. 12 соответствует эмпирической формуле Бугера, штриховая — формуле Френеля. При углах падения до 30° кривые идут очень близко и по образцу формулы Бугера могли бы быть построены еще лучшие приближенные выражения (следует учесть, что Бугер считал

Угол падения (в градусах)	Коэффициент отражения (в %)	
	по Бугеру	по Френелю
0	1.8	2.0
10	1.8	2.0
20	1.8	2.0
30	1.9	2.1
40	2.2	2.4
50	3.4	3.4
60	6.5	6.0
65	9.7	8.7
70	14	13
75	21	21
80	33	35
85	50	58

что для предельно скользящего света коэффициент отражения равен не 1, а $\frac{3}{4}$ и соответственно выбирал числовые коэффициенты в своей формуле). Приближенные формулы, дающие в простом и наглядном виде зависимость коэффициента отражения неполяризованного света от угла падения (при заданном показателе преломления) могли бы быть полезны в фотометрической практике.

Точки, по результатам измерений Бугера, столь удовлетворительно ложатся на теоретическую кривую, построенную по формуле Френеля, что и в этом случае можно вновь удивляться экспериментальному искусству Бугера, умевшего получать точные данные, пользуясь лишь дневным светом, кусками картона и собственным глазом.

76 Расчет подтверждает правильность измеренных Бугером значений.

Рассмотрим плоскопараллельный слой диэлектрика (рис. 13), задняя поверхность которого непосредственно соприкасается с металлом (слой воды на ртути, обычное стеклянное зеркало). Обозначим коэффициент отражения от металла (задней стороны слоя) через R и будем считать, что он не зависит от угла падения. Обозначим через ρ коэффициент отражения

от диэлектрика (передней поверхности слоя), он при скользящем падении света будет резко зависеть от угла падения.

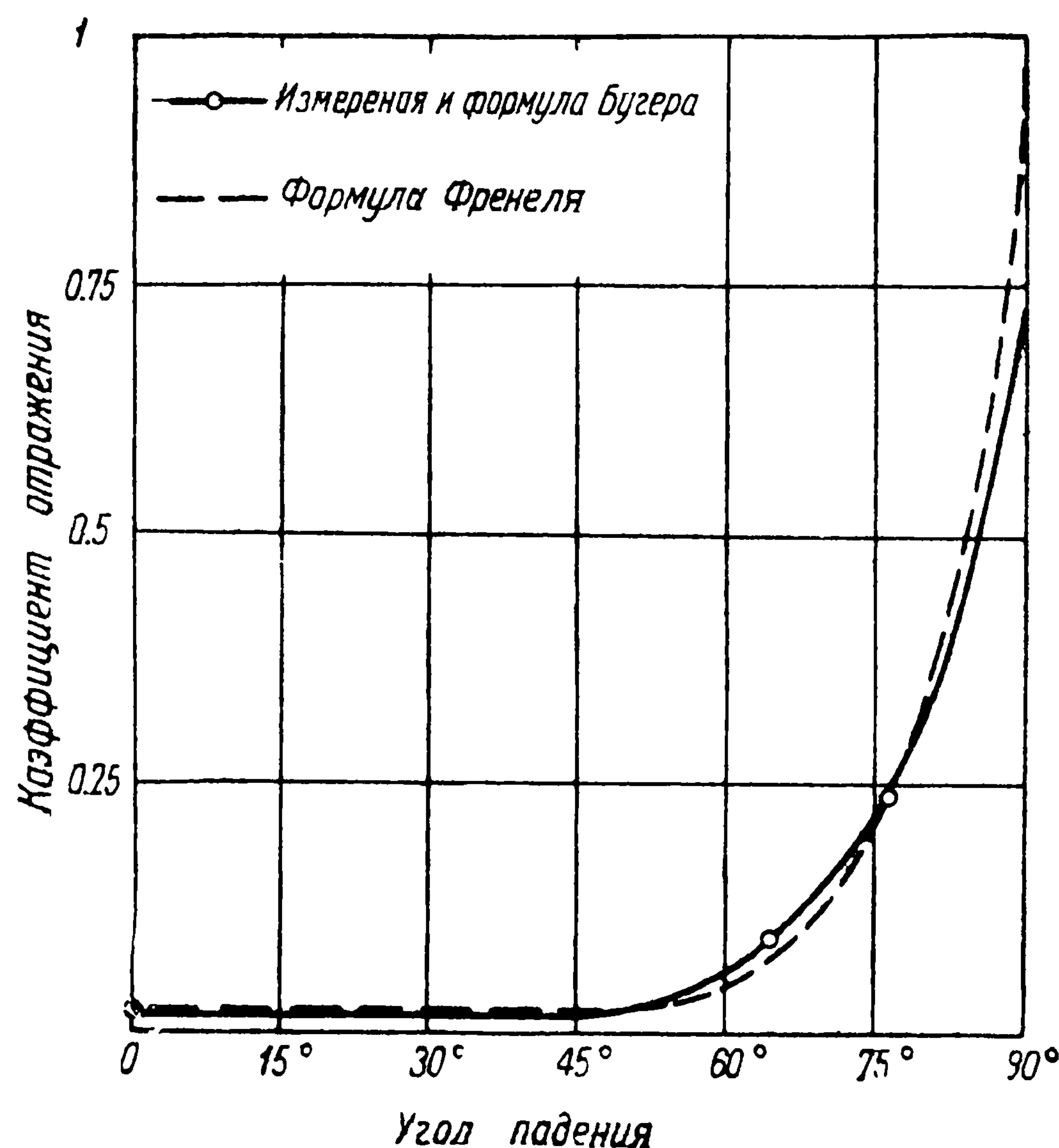


Рис. 12.

Отражения в передней и задней плоскостях (наружное и внутреннее будут равноинтенсивны при условии

$$\rho = (1-\rho)^2 R.$$

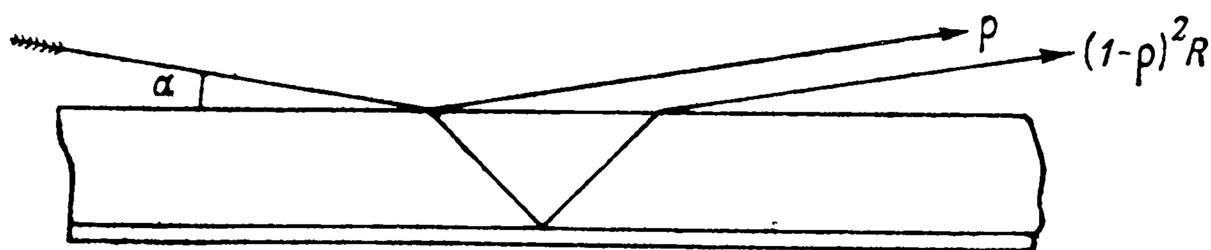


Рис. 13.

Принимаемому Бугером значению $R = \frac{3}{4}$ действительно соответствует $\rho = \frac{1}{3}$, а треть света отражается при падении на воду $\left(n = \frac{4}{3}\right)$ под углом $\alpha = 10^\circ$ к поверхности и при падении на стекло ($n = 1.55$) под углом $\alpha = 12^\circ$ к поверхности. Бугер экспериментально получил 10° в случае воды

13—14° в случае стекла. Значения углов, при которых оба изображения кажутся равнояркими, сравнительно мало зависят от коэффициента отражения R. Так, например, изменению R от 0.6 до 0.9 соответствует в случае воды изменение рассматриваемого угла α от 11.5 до 9.5°, а в случае стекла от 13 до 11°.

Можно, воспользовавшись приближенными выражениями коэффициентов отражения для больших углов падения,* написать в явном виде зависимость искомого угла α от значений показателя преломления n и коэффициента отражения R.

[77] В оригинале ошибочно указывается на фиг. 16.

[78] Приведем вывод выражения для астигматической разности в пучке лучей, испытавшем внутреннее отражение в плоскопараллельной пластинке. Построим рис. 14 в соответствии с фиг. 17 на стр. 116 трактата.

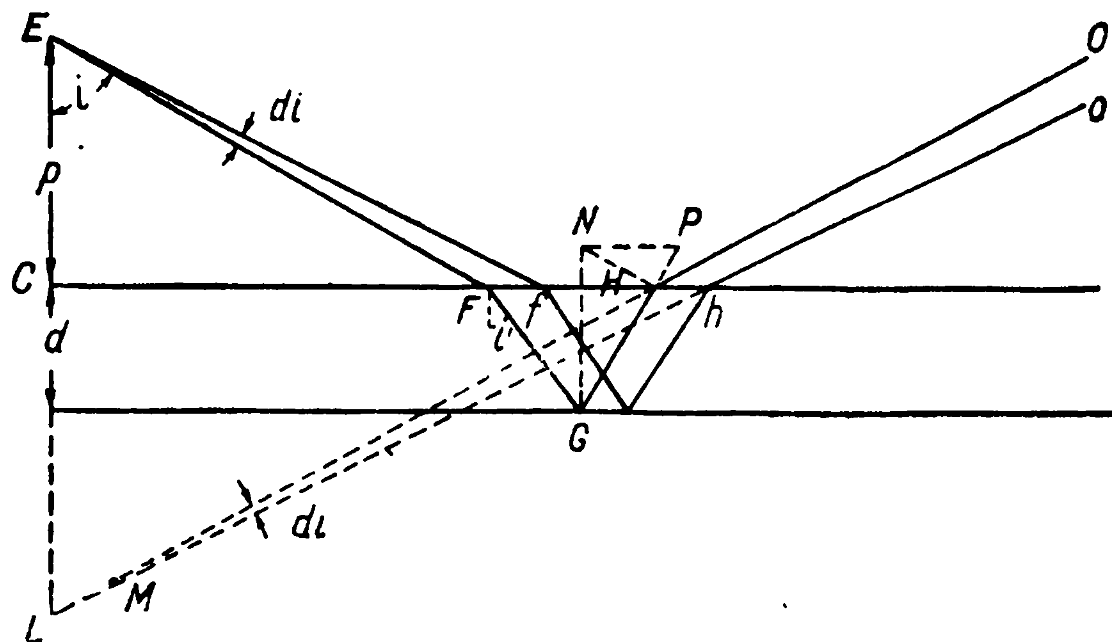


Рис. 14.

Обозначим через d толщину плоскопараллельного слоя, через n_0 — показатель преломления, через i и i' — соответственно углы падения и преломления.

Рассмотрим лучи EF и Ef, падающие на слой под углами i и $i+di$ и идущие внутри слоя под углами i' и $i'+di'$ к перпендикуляру.

Поскольку

$$\sin i = n_0 \sin i',$$

то

$$\cos i \cdot di = n_0 \cdot \cos i' \cdot di'.$$

Если обозначить расстояние EC через p, то

$$CH = CF + FH = p \cdot \operatorname{tg} i + 2d \cdot \operatorname{tg} i'.$$

* А. Гершун. Приближенное выражение формул Френеля для больших углов падения. Доклады Академии Наук СССР, том 32, № 6, 1941.

Смещение точки выхода луча, т. е. отрезок Hh, может рассматриваться как приращение отрезка CH при изменении угла i:

$$Hh = \frac{p \cdot di}{\cos^2 i} + \frac{2d \cdot di'}{\cos^2 i'} = \left(\frac{p}{\cos^2 i} + \frac{2d \cdot \cos i}{n_0 \cdot \cos^3 i'} \right) di.$$

Лучи HO и ho кажутся исходящими из точки M, являющейся изображением точки E в меридиональных лучах. Эти лучи образуют между собой угол

$$di = \frac{Hh \cdot \cos i}{HM},$$

откуда следует, что

$$HM = \frac{Hh \cdot \cos i}{di} = \frac{p}{\cos i} + \frac{2d \cdot \cos^2 i}{n_0 \cdot \cos^3 i'} \cdot$$

Расстояние от точки H до сагиттального изображения L равно:

$$HL = \frac{CH}{\sin i} = \frac{p}{\cos i} + \frac{2d \operatorname{tg} i'}{\sin i} = \frac{p}{\cos i} + \frac{2d}{n_0 \cdot \cos i'} \cdot$$

Астигматическая разность не зависит от расстояния p до светящей точки и равна:

$$LM = HL - HM = \frac{2d}{n_0 \cdot \cos i'} \left(1 - \frac{\cos^2 i}{\cos^2 i'} \right) \cdot$$

Это выражение, как это и должно быть, совпадает с известной формулой для астигматической разности при прохождении света сквозь плоскопараллельную пластинку толщины $2d$.*

Теперь нам следует обосновать графический прием расчета Бугера, исходя из выведенной формулы для астигматической разности. Она может быть написана в виде

$$LM = \frac{2d}{n_0 \cdot \cos i'} \; \frac{\sin^2 i - \sin^2 i'}{\cos^2 i'} = \frac{2d (n_0^2 - 1) \sin^2 i'}{n_0 \cos^3 i'} \cdot$$

---

* А. И. Тудоровский. Теория оптических приборов. I, § 43. Изд. Академии Наук СССР, 1948.

Поскольку

$$HG = \frac{d}{\cos i'}$$

$$HN = HG \cdot \operatorname{tg} i' = \frac{d \sin i'}{\cos^2 i'}$$

$$HP = HN \operatorname{tg} i' = \frac{d \sin^2 i'}{\cos^3 i'},$$

то

$$LM = \frac{2(n_0^2 - 1)}{n_0} HP.$$

В обозначениях Бугера

$$n_0 = \frac{m}{n}$$

и, соответственно:

$$LM = \frac{2m^2 - 2n^2}{mn} HP.$$

При

$$n_0 = m : n = 4 : 3$$

получаем, как это и указывает Бугер,

$$LM = \frac{7}{6} HP.$$

79 В оригинале ошибочно указывается на фиг. 16.

80 Бугер считает, что при полном внутреннем отражении, когда ни один луч не выходит из среды в воздух, отражаются не все лучи, а лишь бо́льшая их часть. Остальная часть лучей погашается на поверхности. Бугер пишет:

„Если луч света падает на призму изнутри под углом падения в 10, 20 или 30 градусов, то ее поверхность производит почти в точности то же действие, что и поверхность ртути, погашая, примерно, четверть или треть лучей и отражая две трети или три четверти“.

Это заблуждение Бугера, как можно предполагать, органически связано с другой его ошибкой, а именно — утверждением, что при уменьшении угла между падающим из воздуха лучом и поверхностью (при предельно скользящем падении света) коэффициент отражения стремится не к 1, а к меньшему значению, примерно равному для воды и стекла $\frac{3}{4}$ (см. примечание 75).

О взглядах Бугера на потери света при вхождении и выходе его из тела с полированными поверхностями говорится также в примечании 86.

81 Для стекла Бугер принимает показатель преломления равным $n = \frac{31}{20} = 1.55$, чему соответствует предельный угол полного внутреннего отражения, равный $\arcsin \frac{1}{n} = 40^\circ\ 11'$ или его дополнение до прямого угла $49^\circ\ 49'$.

Соответственно для воды Бугер принимает $n = \frac{529}{396} = 1.3359$, чему соответствует предельный угол полного внутреннего отражения $48^\circ\ 28'$ или его дополнение до прямого угла $41^\circ\ 32'$.

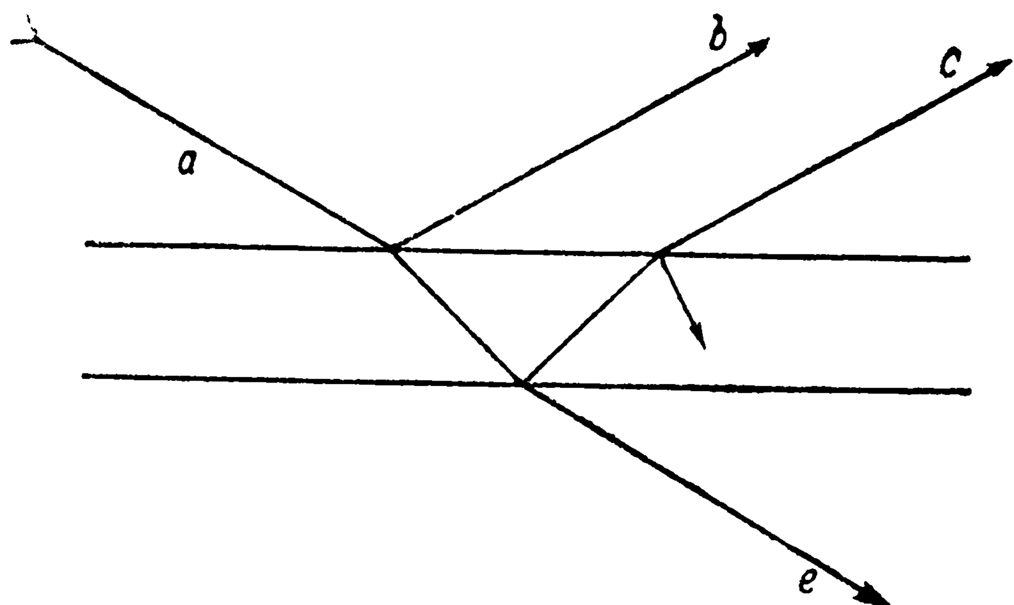


Рис. 15.

82 В старой математической литературе под тригонометрической функцией угла понимали линейный отрезок, равный по длине произведению из длины постоянного отрезка (называвшегося полным синусом) на соответствующую тригонометрическую функцию в современном понимании. Поэтому при расчетах часто приходилось брать отношение длины данной линии (например синуса, косинуса) к той длине, которая играла роль полного синуса.

83 В оригинале пропущено слово „трети".

84 Названные Бугером величины a, b, c, e, повидимому, правильно и допустимо трактовать как яркости падающего, отраженных и прошедшего лучей (или соответетствующие световые потоки), так, как это иллюстрируется рис. 15.

Обозначив через ρ коэффициент отражения при падении света извне и через z соответствующее значение коэффициента отражения при обратном направлении света, когда он идет изнутри (Бугер считал, что $z \neq \rho$) и через t — коэффициент пропускания на ординарном пути луча в слое, получаем:

$$b = \rho a$$

$$c = (1 - \rho)(1 - z) z t^2 a$$

$$e = (1 - \rho)(1 - z) t a.$$

Отсюда
$$c = \frac{ze^2}{a(1-\rho)(1-z)} = \frac{ze^2}{(a-b)(1-z)}$$
и
$$z = \frac{(a-b)c}{e^2 + c(a-b)}\,.$$

Считая, что значение z мало по сравнению с 1, получаем:
$$z = \frac{(a-b)c}{e^2}.$$

Именно эту формулу, если только толкование введенных Бугером величин правильно, он и приводит.

[85] Это соответствует тому, что расстояния от свечи до дощечек находились в отношении 600 к 493.

[86] Итак, изыскания Бугера о количестве света, отражаемого телами с полированными поверхностями, привели его к ряду существенных открытий и заключений, но некоторые предположения Бугера воспринимаются ошибочными. Бугер считает, что при падении света снаружи под предельно малым углом к поверхности отражается не весь свет, а примерно три четверти его.

При изменении направления луча на обратное, доля отраженного света, по мнению Бугера, меняется. От поверхности раздела стекла и воздуха при перпендикулярном падении света отражается, по данным Бугера, $\frac{1}{36}$ часть, если свет идет из воздуха (извне), и $\frac{1}{27}$ часть, если свет приходит из стекла (изнутри). Отметим, что при переходе света по нормали через поверхность стекла с показателем преломления $n = 1.55$ отражается на самом деле $\frac{1}{21}$ часть, независимо от того, приходит ли свет извне или изнутри.

Бугер считает, что при падении света на поверхность прозрачного тела изнутри он не только частично отражается, но и частично поглощается, то есть, что поверхность в этом случае как бы не вполне прозрачна. При падении, света близком к перпендикулярному, в случае стекла отражается $\frac{1}{27}$ часть и примерно такая же часть дополнительно гасится. При полном внутреннем отражении примерно три четверти света отражается и одна четверть света гасится

Итак, при прохождении света сквозь прозрачное стекло он ослабляется по мнению Бугера, по трем причинам: отражения на поверхности входа, отражения на поверхности выхода, поглощения на поверхности выхода. Последнее явление Бугер считает отличным от поглощения в толще, что непосредственно вытекает из следующих фраз, которыми начинается книга третья трактата:

„Мы видели, что, входя в прозрачное тело, свет частично возвращается назад вследствие отражения и что часть, проходящая внутрь и выходящая с противоположной стороны, вновь разделяется благодаря новому отражению; в то же время многие лучи ослабляются или угасают, что в свой черед приводит к еще большей убыли света. Однако помимо сих трех весьма заметных изменений свет претерпевает еще и четвертое изменение, которое может подчас оказаться весьма большим, когда длина пути света в прозрачном теле велика. На первых трех изменениях толща среды не сказывается: они обусловлены лишь тем, что свет встречает на своем пути две поверхности, в то время как изменение, о котором идет речь, проистекает от препятствий, чинимых внутренними частями прозрачного тела...".

Научную честь Бугера защищают те слова, которыми он завершает рассмотрение вопроса о потерях света на поверхностях и, вместе с тем, изложение второго раздела второй книги трактата:

„Наконец, в громадном числе случаев речь идет не столько о разделении этих трех различных изменений, сколько об их совместном действии. Все три вместе ослабляют свет примерно на одну десятую часть в кусках нашего обычного стекла, подвергнутых достаточной полировке. Мы не устанем, однако, повторять, что не следует ничего утверждать слишком уверенно, когда мы вынуждены остановиться на наблюдениях, требующих столь изощренного внимания или, скорее, скрупулезности, в особенности в отношении третьего из изменений, нахождение которого связано с наибольшими трудностями".

87 В подлиннике название главы опущено; оно восстановлено по оглавлению.

88 При рассмотрении представленных в таблице на стр. 134 результатов измерений полезно сопоставить их с числами следующей таблицы, поскольку освещенность поверхностей при их наклоне изменялась пропорционально косинусу угла падения.

Наклон падающих и зрительных лучей по отношению к поверхности (в градусах)	Угол падения (в градусах)	Косинус угла падения (относительные значения)
90	0	1000
75	15	966
60	30	866
45	45	707
30	60	500
15	75	259

[89] В первом столбце таблицы на стр. 136 приведены углы падения, в следующих столбцах — относительные значения силы света в направлении, обратном направлению падения света. Они получены умножением на косинус угла падения относительных значений яркости, представленных в таблице на стр. 134. Для поверхностей, удовлетворяющих так называемому „закону Ламберта", числа таблицы для „распределения маленьких неровностей" должны были бы быть пропорциональны квадратам косинуса угла падения.

[90] В оригинале „Numératrice des aspérités".

Эта кривая получается построением в полярных координатах зависимости силы света поверхности от угла падения на нее света, причем сила света берется в направлении, обратном направлению падающего на нее пучка света, который во всех случаях считается неизменным. Яркость поверхности в направлении, обратном направлению падающего света, прямо пропорциональна соответствующему радиусу — вектору (или, как говорит Бугер, ординате) и обратно пропорциональна косинусу угла падения. При этом следует помнить, что неизменной считается не освещенность поверхности, а освещенность перпендикулярно падающими лучами в том месте, где расположена поверхность. Освещенность самой поверхности изменяется при этом, следовательно, пропорционально косинусу угла падения.

[91] Следует отметить, что из теории Бугера вытекает, что яркость поверхности, для которой нумератриса неровностей имеет форму круга $ChDg$ (фиг. 21 на стр. 138 трактата), по различным направлениям различна.

[92] Бугер излагает построенную им теорию отражения света шероховатыми поверхностями языком геометрических построений, начиная с частных случаев и переходя в дальнейшем к более общим. Истолкуем ее аналитически.

На рассматриваемую поверхность по направлению LC падает параллельный пучок света от удаленного источника L; обозначим угол падения через i (рис. 16). Поверхность рассматривается также издали в направлении OC, характеризуемом зенитным расстоянием i' и азимутом A.

Бугер считает, что сила света поверхности в данном направлении пропорциональна, во-первых, числу (площади) элементарных зеркальных граней, отражащих падающий свет в этом направлении, и, во-вторых, освещенности этих граней. Это суть те грани, нормаль к которым имеет направление CE, лежащее в плоскости падающего и отраженного (зрительного) лучей и делящее угол ε между ними пополам.

Число этих граней зависит от угла δ, образуемого направлением CE с направлением CD нормали к макроповерхности (большой поверхности, как ее называет Бугер). Обозначим площадь этих граней через $f(\delta)$. Освещенность граней будет равна произведению из освещенности $\mathcal{E}$

в точке C, создаваемой перпендикулярно падающими лучами, и косинуса угла падения $\frac{\varepsilon}{2}$.

Следовательно, сила света $I(i', A)$ поверхности в направлении CO с координатами i' и A будет равна

$$I(i', A) = C' \mathcal{E} f(\delta) \cos\frac{\varepsilon}{2},$$

где множитель C' очевидно пропорционален площади поверхности; численное его значение зависит от нормирования функции $f(\delta)$.

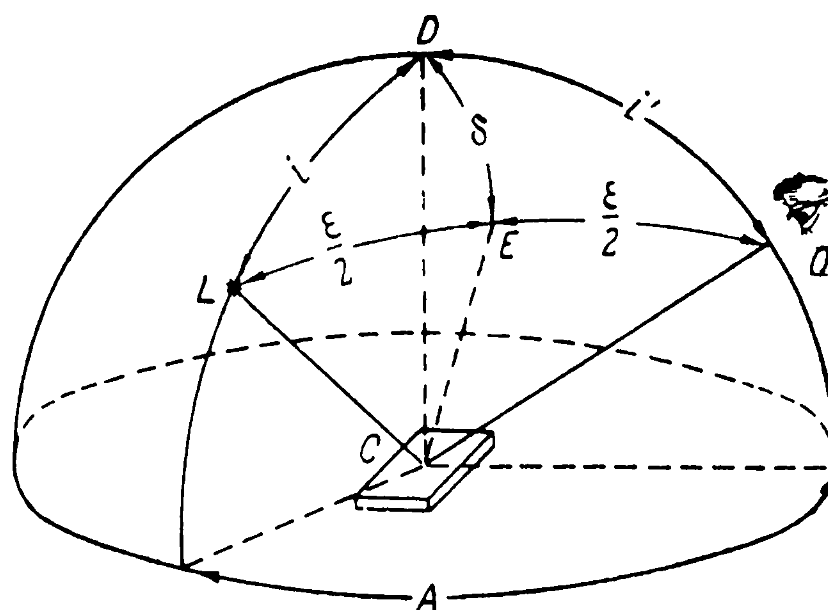


Рис. 16.

Яркость в рассматриваемом направлении можно считать равной

$$B(i', A) = C\mathcal{E}\frac{f(\delta)\cos\frac{\varepsilon}{2}}{\cos i'},$$

где C — множитель пропорциональности.

Углы ε и δ аналитически определяются соотношениями:

$$\cos\varepsilon = \cos i \cos i' + \sin i \sin i' \cos A,$$

$$\cos\delta = \frac{\cos i + \cos i'}{2\cos\frac{\varepsilon}{2}}.$$

Если $A = 0$:

$$\varepsilon = |i' - i|$$

$$\delta = \frac{i' + i}{2}.$$

Яркость в направлении, обратном направлению падающего света, будет равна

$$B(i, 0) = C\mathcal{E}\,\frac{f(i)}{\cos i}.$$

Этой формулой и определяются способы нахождения и построения нумератрисы неровностей.

Если $A = 180°$:

$$\varepsilon = i' + i$$

$$\delta = \left|\frac{i' - i}{2}\right|.$$

Описываемые Бугером способы расчета яркости светящей отраженным светом матовой поверхности сводятся к графическим приемам определения величины

$$\frac{f(\delta)\cos\frac{\varepsilon}{2}}{\cos i'}.$$

Против теории Бугера может быть выдвинут ряд возражений, даже если не подвергать критике положенных в ее основу предпосылок. Такими предпосылками являются возможность пренебрежения волновыми свойствами света (диффракционными и интерференционными явлениями), затенением одних граней другими (микротенями на поверхности, экранированием отраженных лучей). О первой предпосылке Бугер не говорит, значение второй осознает в полной мере.

Возражение могло бы вызвать наличие множителя $\cos\frac{\varepsilon}{2}$ в выражении для яркости. Это вытекает из следующих соображений. Освещенность граней и, следовательно, падающий на них световой поток действительно изменяются пропорционально $\cos\frac{\varepsilon}{2}$. Однако для расчета силы света нужно учитывать не только световой поток, но и тот телесный угол, в котором он будет сосредоточен. После зеркального отражения под углом $\frac{\varepsilon}{2}$ от граней, нормали к которым лежат в пределах телесного угла $d\omega$, световой поток будет распределен, как это показывает простое построение, в телесном угле, равном $4\cos\frac{\varepsilon}{2}\cdot d\omega$. Следовательно, при вычислении силы света множитель $\cos\frac{\varepsilon}{2}$, появляясь в числителе и знаменателе, исчезает.

В шестой главе четвертого раздела второй книги Бугер указывает, что он был вынужден ввести множитель $\cos\frac{\varepsilon}{2}$ на основании результатов опытов и подробно обосновывает это.

Зависимость от угла $\frac{\varepsilon}{2}$ может также войти, если принять, чего не делал Бугер, что коэффициент отражения света элементарными гранями различен при разных углах падения. Это приведет к формуле вида

$$B(i', A) = C\mathcal{E}\frac{f(\delta)\varphi\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{\cos i'} = CE\frac{f(\delta)\varphi\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{\cos i \cdot \cos i'},$$

где E — освещенность макроповерхности.

К основным представлениям теории Бугера отражения света матовыми поверхностями не раз возвращались как в XIX в., так и в текущем столетии авторы исследований по данному вопросу. Но сама теория не излагалась, аналитические эквиваленты геометрическим построениям Бугера не приводились. Значение созданной Бугером теории очерчено в приложенной статье о Бугере.

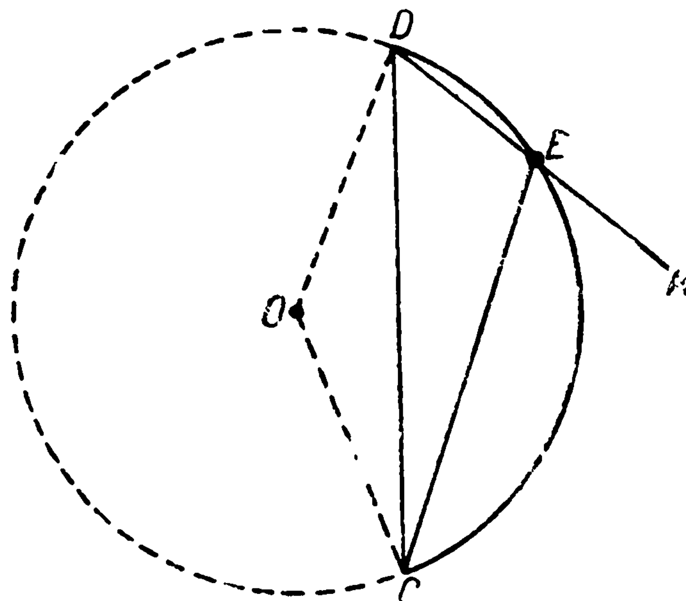


Рис. 17.

93 Слово „королларий“ (латинское Corollarium) означает в буквальном смысле венок, а в переносном — прибавление, добавление.

94 На фиг. 22 исправлена опечатка в оригинале, где вместо O' указано O.

95 Удобно перед изучением фиг. 23 на стр. 146 трактата рассмотреть рис. 17. CED есть правая ветвь нумератрисы для матовых серебряных пластинок; левая, которая не изображена, ей симметрична. Угол DOC Бугер считает равным 114°. Бугер строит свое доказательство на том, что угол CEM, независимо от положения точки E, равен половине соответствующего центрального угла DOC.

96 Приведем доказательство справедливости этого построения, которое Бугер, так же, как и для предшествующего построения, опускает. Считаем поверхность AB (фиг. 25 на стр. 149 трактата) горизонтальной. Обозначим через ε угол между падающим и зрительным лучами и через δ искомый угол с вертикалью, образуемый биссектрисой угла ε. Угол i', образуемый зрительным лучом с вертикалью, может быть принят равным $\delta + \frac{\varepsilon}{2}$ или $\delta - \frac{\varepsilon}{2}$.

На основании пункта 4 главы VI третьего раздела второй книги следует принять $i' = \delta + \frac{\varepsilon}{2}$.

По теории Бугера, яркость будет пропорциональна

$$\frac{f(\delta)\cos\frac{\varepsilon}{2}}{\cos i'} = \frac{f(\delta)\cos\frac{\varepsilon}{2}}{\cos\left(\delta + \frac{\varepsilon}{2}\right)},$$

где $f(\delta)$ — радиус-вектор. Следовательно, надо искать при заданном ε то значение δ, при котором достигает максимального значения величина

$$\frac{f(\delta)}{\cos\left(\delta + \frac{\varepsilon}{2}\right)}.$$

Условие максимума может быть записано в виде

$$\frac{df(\delta)}{f(\delta)} = -\operatorname{tg}\left(\delta + \frac{\varepsilon}{2}\right)\cdot d\delta.$$

Другими словами, нужно найти такую точку на кривой (нумератрисе), для которой угол между радиусом-вектором и нормалью к кривой (иначе говоря, угол между перпендикуляром к радиусу-вектору и касательной к кривой) равен $\delta + \frac{\varepsilon}{2}$. Дальше нетрудно убедиться, что графический способ решения задачи, иллюстрируемый фиг. 25 трактата, исходит из этого условия.

Предлагаемый Бугером прием не является простейшим из возможных.

[97] Построение соответствует определению пропорциональной яркости величины (см. фиг. 26 на стр. 150 трактата и примечание 92):

$$\frac{f(\delta)\cos\frac{\varepsilon}{2}}{\cos i'},$$

где

$$\delta = \angle ZCQ; \quad f(\delta) = CE; \quad \frac{\varepsilon}{2} = \angle LCQ = \angle QCO; \quad i' = \angle ZCO.$$

[98] Величина

$$s = a\cdot\sin(90^\circ - \delta) = a\cdot\cos\delta,$$

где a — постоянная, а δ — угол между лучом и нормалью. Следовательно, Бугер предлагает для нумератрисы неровностей эмпирическую формулу

$$f(\delta) = a\cdot\cos\delta + b\cdot\cos^m\delta.$$

Интересно отметить, что современные исследователи вопросов фотометрии планет приходят к соотношению того же вида.*

Для поверхностей планет Бугер считает возможным принимать в первом приближении $m = 0$.

Такого же вида формула, по мнению Бугера, может служить и для силы света элемента поверхности солнца. Приводимый для этого случая расчет числовых коэффициентов непонятен как по исходным данным, так и по соотношению знаков и значений постоянных a и b.

Рис. 18.

99 Яркость в некоторой точке C планеты, если исходить из представлений Бугера, определяется относительным числом тех зеркальных граней которые отражают падающий от солнца свет к земному наблюдателю Расчет иллюстрируется фиг. 27 на стр. 154 трактата и построенным в соответствии с нею более схематизированным рис. 18.

Отражать свет в направлении к земному наблюдателю будут те элементарные грани, нормали к которым имеют направление CH, параллельное направлению EP, делящему пополам фазовый угол LEO (угол между направлением LE падающих от солнца L лучей, считаемых параллельными,

---

* Н. Н. Сытинская. Определение степени гладкости поверхности планет фотометрическими методами. Ученые записки Ленинградского Государственного университета 1949 г. Серия математических наук, выпуск 18.

и направлением EO к земному наблюдателю O, считаемому бесконечно удаленным).

Яркость в некоторой точке C планеты, в соответствии с теорией Бугера, определяется величиной

$$\frac{f(\delta)\cdot\cos\frac{\varepsilon}{2}}{\cos i'},$$

где $\frac{\varepsilon}{2} = \angle LEP = \angle PEO$ — половинное значение фазового угла ε между направлением падения света (падающим лучом) и направлением наблюдения (зрительным лучом);

i' — угол между нормалью и зрительным лучом (угол между направлениями DCE и OME);

$\delta = \angle DCH = \angle CEP$ — угол между нормалью и „средним направлением", т. е. биссектрисой угла между падающим и зрительным лучами;

$f(\delta)$ — радиус-вектор полярной кривой, соответствующий углу δ („средняя ордината нумератрисы неровностей").

Множитель $\cos\frac{\varepsilon}{2}$ имеет для всех точек планеты одинаковое значение. Если характеризовать положение точки C угловыми координатами φ и ψ, то

$$\cos\delta = \cos\psi\cdot\cos\left(\varphi - \frac{\varepsilon}{2}\right)$$

$$\cos i' = \cos\psi\cdot\cos\varphi.$$

Для расчетов Бугер выполняет следующие графические построения. Из точки C он опускает перпендикуляр CR на плоскость GMK, а из точки R перпендикуляр RS на биссектрису EP угла LEO.

Нетрудно убедиться, что

$$ES = ER\cdot\cos\left(\varphi - \frac{\varepsilon}{2}\right) = EC\cdot\cos\psi\cos\left(\varphi - \frac{\varepsilon}{2}\right) = EK\cdot\cos\delta$$

и, следовательно,

$$\cos\delta = \frac{EC}{EK}.$$

Бугер, в соответствии с эмпирическим выражением для функции $f(\delta)$, принимает (см. примечание 98):

$$f(\delta) = ES + b\left(\frac{ES}{EK}\right)^m.$$

Угол i' Бугер определяет следующим образом. Из точки R он опускает перпендикуляр RT на прямую OE и соединяет точку C с точкой T. Отрезок ET равен

$$ET = ER \cdot \cos\varphi = EC \cdot \cos\psi \cdot \cos\varphi = EC \cos i'.$$

Следовательно

$$\cos i' = \frac{ET}{EK}.$$

Поскольку множитель $\cos\frac{\varepsilon}{2}$ имеет для всех точек планеты одинаковое значение, яркость в различных ее точках определяется величиной

$$\frac{f(\delta)}{\cos i'} = EK \cdot \frac{ES + b\left(\frac{ES}{EK}\right)^m}{ET}.$$

100 Повидимому, сущность рассуждений Бугера об абсолютной величине маленьких граней шероховатых поверхностей может быть передана следующим образом.

Свет отражается зеркально от маленьких неровностей или шероховатостей на матовых поверхностях. Эти неровности, как правило, отличны от зеркальных полусфер, их форма неправильна и грани разного наклона представлены в неравной мере. Пусть площадь граней, нормали к которым лежат в пределах телесного угла $d\omega$, образуя угол δ с нормалью к макроповерхности, равна

$$d\sigma = f(\delta) \cdot d\omega.$$

Значения $f(\delta)$ очевидно пропорциональны площади поверхности.

Задача заключается в нормировании функции $f(\delta)$, определенной с точностью до постоянного множителя. Для этого поступаем следующим образом. Если σ_0 есть площадь макроповерхности, то

$$d\sigma_0 = \cos\delta \cdot d\sigma = f(\delta)\cos\delta \cdot d\omega$$

и, следовательно:

$$\sigma_0 = \int\limits_{(2\pi)} f(\delta) \cdot \cos\delta \cdot d\omega,$$

где (2π) есть символ интегрирования по полусфере.

Полагая

$$d\omega = 2\pi \sin\delta \cdot d\delta,$$

получаем

$$\sigma_0 = 2\pi \int\limits_{\delta=0}^{\delta=\frac{\pi}{2}} f(\delta) \cdot \cos\delta \quad \sin\delta \cdot d\delta.$$

Отсюда определяется „масштаб“ кривой $f(\delta)$.

Принимаем, что рассматриваемая поверхность имеет форму круга радиуса a, т. е. что

$$\sigma_0 = \pi a^2.$$

Считаем известными относительные значения $\frac{f(\delta)}{f(0)}$ и обозначаем через z значение $f(\delta)$, если положить $f(0) = a$, т. е. принимаем

$$\frac{f(\delta)}{f(0)} = \frac{z}{a}.$$

Вводим для искомого абсолютного значения $f(0)$ обозначение

$$f(0) = r^2$$

а также используем обозначение

$$f(\delta) = u^2$$

Отсюда

$$f(\delta) = u^2 = r^2 \frac{z}{a} \cdot$$

Исходя из написанного выше выражения для σ_0 и используя обозначение

$$s = a \cdot \cos\delta,$$

получаем

$$r^2 = \frac{a^5}{2\int z \cdot s \cdot ds}, \qquad u^2 = \frac{a^4 z}{2\int z \cdot s \cdot ds}.$$

т. е. те соотношения, которые и приводит Бугер, излагая их вывод несколько чуждым современному читателю языком. Для идеализированной поверхности Бугера, покрытой зеркальными полусферами, величина z является постоянной и

$$f(\delta) = u^2 = r^2 = a^2.$$

Исходные рассуждения Бугера могли бы быть пересказаны следующим образом. Грани, образующие с макроповерхностью углы от δ до $\delta + d\delta$,

с общей площадью $d\sigma$ могут рассматриваться в совокупности как соответствующий кольцевой пояс на сфере, радиус u которой определяется из соотношения

$$2\pi \cdot u^2 \cdot \sin\delta \cdot d\delta = d\sigma,$$

откуда

$$u = \sqrt{f(\delta)}.$$

Итак, грани с наклоном от δ до $\delta + d\delta$ могут по Бугеру рассматриваться в совокупности как пояс на фиктивной зеркальной сфере радиуса u, ограниченный параллелями, соответствующими углам δ и $\delta + d\delta$. Если по нормали к поверхности падает свет, создавая освещенность $\mathcal{E}$, то сила света поверхности в направлении, определяемом зеркально отражающими гранями под углом δ, будет, следовательно, равна (см. примечание 66):

$$I = \frac{\mathcal{E}\, u^2}{4}.$$

Если обозначить через E' освещенность перпендикулярно падающими отраженными лучами от поверхности на расстоянии D от нее, то

$$E' = \frac{I}{D^2} = \frac{\mathcal{E}\, u^2}{4\, D^2},$$

откуда

$$E' : \mathcal{E} = \frac{u^2}{4} : D.$$

Формулировкой этого соотношения Бугер и завершает главу I четвертого раздела первой книги. Если рассматривается отражение света по нормали к макроповерхности, то вместо u^2 следует подставить r^2.

[101] „Знак :: выражает, что величины, стоящие по его сторонам, пропорциональны".*

Запись

$$FC = a : FG = ds :: KC = r\sqrt{\frac{z}{a}} : KL = \frac{r\,ds}{a}\sqrt{\frac{z}{a}}$$

в весьма концентрированном виде содержит следующие соотношения:

$$FC : FG = KC : KL$$

$$FC = a$$

$$FG = d$$

$$KC = r\sqrt{\frac{z}{a}},$$

* И. Ньютон. Всеобщая арифметика. Изд. Академии Наук СССР. 1948, стр. 15.

откуда

$$KL = \frac{FG \cdot KC}{FC} = \frac{r \cdot ds}{a}\sqrt{\frac{z}{a}}.$$

Отметим, что в оригинале допущена опечатка в знаменателе выражения для KC (a вместо $\sqrt{a}$), исправленная в переводе.

102 При рассмотрении вывода Бугера удобно сопоставить фиг. 29. на стр. 161 трактата рис. 19.

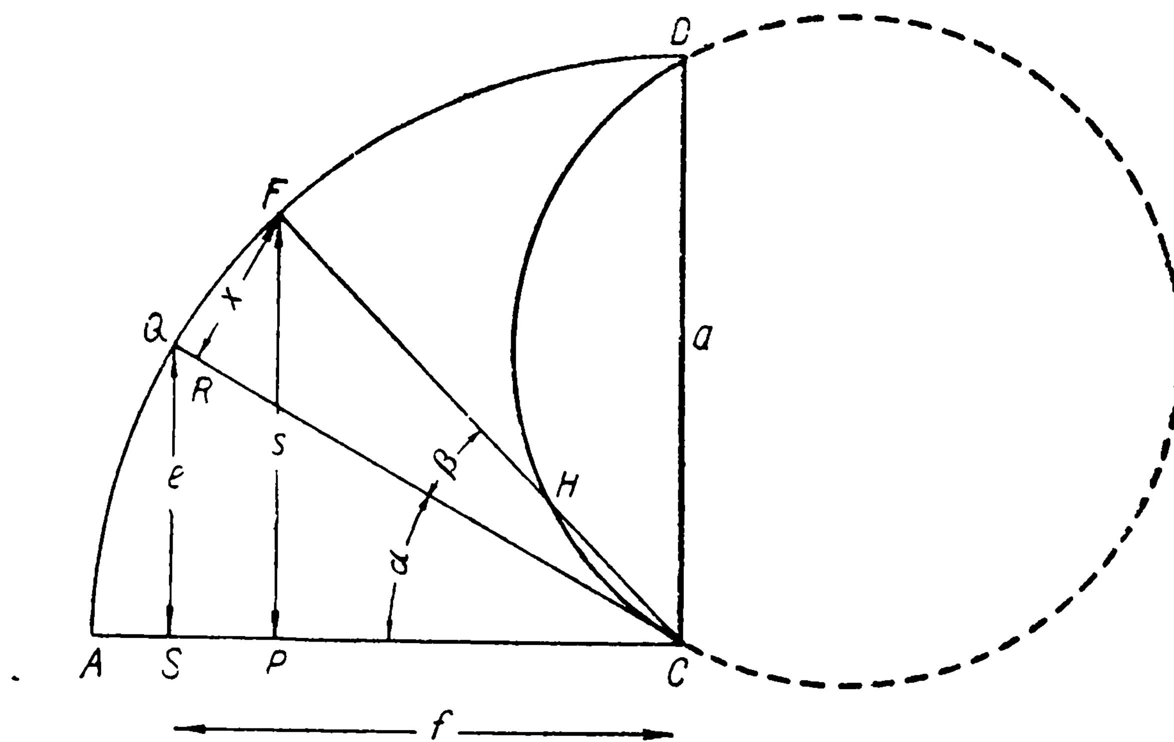


Рис. 19.

Введя углы α и β, получаем:

$$e = a \sin \alpha$$
$$f = a \cos \alpha$$
$$x = a \sin \beta$$
$$s = a \sin (\beta + \alpha) = \frac{fx + e\sqrt{a^2 - x^2}}{a}$$
$$z = HC = \frac{a \sin \beta}{\cos \alpha} = \frac{ax}{f}.$$

Подставив

$$a = 1000$$
$$\alpha = 33^\circ$$

в конечную формулу Бугера, получаем:

$$r = a\sqrt{\frac{3a}{2a - 2e}} = a\sqrt{\frac{3}{2(1 - \sin \alpha)}} = 1815.$$

Отметим, что прямая DV на фиг. 29 трактата должна была бы быть проведена перпендикулярно QC.

103 Освещенность E' отраженным светом на расстоянии D от диска радиуса a, освещенность которого равна $\mathcal{E}$, Бугер вычисляет по формуле (см. примечание 100):

$$E' = \frac{\mathcal{E}\, u^2}{4} : D^2,$$

откуда

$$\frac{E'}{\mathcal{E}} = \frac{u^2}{4D^2}.$$

При расчете табличных значений принято $a = 100$, соответственно чему в рассматриваемом примере следует положить $D = 600$, что дает

$$\frac{E'}{\mathcal{E}} = \frac{24875}{4.600^2} = \frac{1}{58}.$$

Для идеализированной поверхности, покрытой зеркальными полусферами, следовало бы подставить $u^2 = a^2 = 10\,000$, что дало бы

$$\frac{E'}{\mathcal{E}} = \frac{1}{144}$$

Экспериментально полученное значение $\frac{1}{150}$ для гипсовой пластинки следует считать сильно преуменьшенным (см. примечание 40).

104 В оригинале допущена исправленная в переводе опечатка в выражении для u^2.

105 При рассмотрении вывода удобно пользоваться параллельно с фиг. 27 на стр. 154 трактата рис. 18, а также обратиться к примечаниям 92 и 99.

Бугер вычисляет величину

$$a \int f(\delta) \cos \frac{\varepsilon}{2}\, d\sigma,$$

пропорциональную силе света планеты, где $d\sigma$ — элемент поверхности планеты радиуса a.

При этом используются обозначения:

$$y = a \sin \psi$$
$$t = a \sin \left(\varphi - \frac{\varepsilon}{2}\right)$$

$$g = a \sin \frac{\varepsilon}{2}$$

$$Q = \frac{\pi a^2}{4}$$

$$Sin\, KW = a \cos \frac{\varepsilon}{2}$$

$$Sin\, MW = a \sin \frac{\varepsilon}{2}.$$

Конечные выражения Бугера для силы света планеты могут быть переписаны в виде:

1) считая $m = 0$, как

$$\pi a^3 \cos \frac{\varepsilon}{2}\left(\cos \frac{\varepsilon}{2} + 2\frac{b}{a}\,\frac{\pi - \varepsilon}{\pi}\right);$$

2) считая $m = 2$, как

$$\pi a^3 \cos \frac{\varepsilon}{2}\left(\cos \frac{\varepsilon}{2} + \frac{2}{3}\,\frac{b}{a}\,\frac{\pi - \varepsilon + \sin \varepsilon}{\pi}\right).$$

Принимая равными 1 максимальные значения, соответствующие противостоянию ($\varepsilon = 0$), получаем относительные значения силы света планет в зависимости от фазового угла ε:

1) считая $m = 0$:

$$\frac{\cos \frac{\varepsilon}{2}\left(\cos \frac{\varepsilon}{2} + 2\frac{b}{a}\,\frac{\pi - \varepsilon}{\pi}\right)}{1 + 2\frac{b}{a}};$$

2) считая $m = 2$:

$$\frac{\cos \frac{\varepsilon}{2}\left(\cos \frac{\varepsilon}{2} + \frac{2}{3}\,\frac{b}{a}\,\frac{\pi - \varepsilon + \sin \varepsilon}{\pi}\right)}{1 + \frac{2}{3}\,\frac{b}{a}}.$$

Последнее выражение, если $\frac{b}{a}$ велико, принимает вид

$$\frac{\pi - \varepsilon + \sin \varepsilon}{\pi} \cos \frac{\varepsilon}{2}.$$

Напомним, что если принять „закон Ламберта", то это приводит к выражению

$$\frac{(\pi - \varepsilon)\cos\varepsilon + \sin\varepsilon}{\pi}.$$

106 В оригинале допущена исправленная в переводе опечатка: вместо $a^2 - y^2$ набрано $a^2 y^2$.

107 В оригинале допущена исправленная в переводе опечатка, а именно:

вместо $ES + b\left(\frac{ES}{EK}\right)^2$ набрано $ES + b\frac{ES^2}{EK}$.

108 Приводимые Бугером выражения, повидимому, ошибочны.

Примечания к третьей книге

109 Для кривой $y = ae^{-kx}$ (рис. 20) подкасательная

$$PT = \frac{1}{k}.$$

110 В оригинале допущена опечатка, исправленная при переводе, а именно: вместо YC напечатано yc.

111 Согласно Бугеру, удельную прозрачность следует определить как величину пропорциональную $\frac{1}{k}$ (см. примечание 109), т. е., например, принять равной длине, на которой свет ослабевает в e раз („свободной длине пути").

При переводе сохранен термин Бугера „градулюцика" („gradulucique") для кривой зависимости освещенности от расстояния в поглощающей среде до светящего тела.

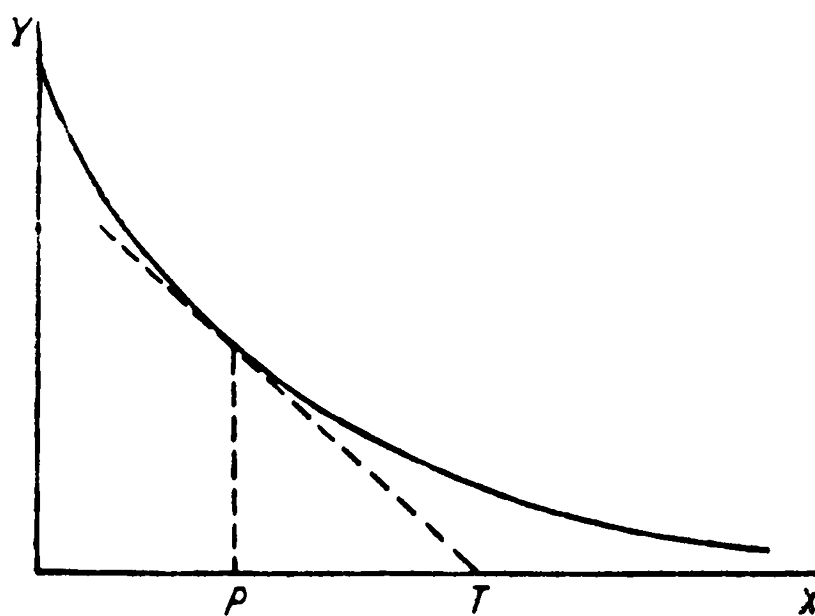


Рис. 20.

112 В оригинале допущена опечатка, исправленная при переводе, а именно: вместо DC напечатано BC.

113 Здесь, повидимому, в трактате опечатка, поскольку

$$\frac{3600}{1 - \frac{1}{3600}} = 3601\frac{1}{3599}.$$

[114] Когда свет ослабевает по закону

$$y = ae^{-kx},$$

то

$$\frac{ln y_1 - ln y_2}{x_2 - x_1} = k,$$

то есть является постоянной величиной.

[115] Подкасательная кривой, выражающей зависимость y от $x = \log_{10} y$, равна

$$M = 0.43429448.$$

Логарифмы Непера, которыми пользовался Бугер, не вполне совпадают с логарифмами в современном понимании; в частности, за нуль принимался Непером логарифм 10^7 (см.: И. Б. Абельсон. Рождение логарифма. Гостехиздат, 1948). Соответственно Бугер принимает подкасательную равной 4342945 частям. Приводимые Бугером во многих местах книги третьей трактата значения логарифмов превышают в 10^7 раз значения десятичных логарифмов.

Бугер обозначал логарифм буквой L. В тексте перевода трактата использовано обозначение Log.

[116] В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка: вместо 78 125 напечатано 73 125.

[117] Если

$$y = ae^{-kn}$$
$$b = ae^{-km},$$

то

$$y = \frac{b^{\frac{n}{m}}}{a^{\frac{n}{m}-1}}.$$

[118] При выполнении этого расчета Бугер не учитывает многократных отражений.

[119] Итак, Бугер принимает, что свет ослабевает на одну сотую часть при прохождении пути в 8.05 см в морской воде или 368 м (в 4575 раз большего) в приземном воздухе.

[120] Вместо 4342948 должно было бы быть 4342945. Значение 4342948 неизменно встречается и на дальнейших страницах трактата.

[121] Когда свет ослабевает по закону

$$y = ae^{-kx}$$

то

$$\frac{\log_{10} y_1 - \log_{10} y_2}{x_2 - x_1} = \frac{0.43429}{\frac{1}{k}},$$

причем 0.43429 есть подкасательная кривой, выражающей зависимость числа от его десятичного логарифма (см. примечание 115), а $\frac{1}{k}$ есть подкасательная кривой $y = ae^{-kx}$ (см. примечание 109).

[122] Понимание логарифма как показателя степени определенного основания во времена Бугера только выкристаллизовывалось. Понятие о логарифмировании как действии, обратном возведению в степень, было введено Эйлером. Сама буква *e* для обозначения основания натуральных логарифмов была выбрана позднее, именно как начальная буква фамилии Euler.

[123] При переводе опущено промежуточное выражение для aP, как содержащее в оригинале опечатку.

[124] Выкладки Бугера могли бы быть переписаны следующим образом. Освещенность в точке P за прозрачным телом (фиг. 35 на стр. 215 трактата) равна

$$q = \frac{Ie^{-k\overline{NP}}}{\overline{aP}^2} \frac{p'}{p},$$

где

$I = pm^2$ — сила света источника,

$\frac{p'}{p}$ — множитель, учитывающий потери на отражение,

$\overline{NP} = n - m$ — толщина прозрачного тела,

$\frac{e}{f}$ — показатель преломления этого тела,

k — показатель поглощения этого тела,

$$\overline{aP} = \frac{(e-f)m + fn}{e}.$$

Введя величины

$$h = \frac{1}{k},$$

$g = M = 0.43429$ — модуль для перехода от основания *e* к основанию 10, получаем:

$$q = \frac{pm^2 10^{-\frac{g}{h}(n-m)}}{\left[\frac{(e-f)m + fn}{e}\right]^2} \frac{p'}{p} = \frac{p' 10^{-\frac{g}{h}(n-m)}}{\left[\frac{(e-f)m + fn}{em}\right]^2},$$

откуда

$$p':q=\left[\frac{(e-f)m+fn}{em}\right]^2:10^{-\frac{g}{h}(n-m)}$$

или

$$\log\frac{p'}{q}-2\log\left[\frac{(e-f)m+fn}{em}\right]=\frac{g}{h}(n-m).$$

Это соотношение Бугер и получает.

[125] В оригинале в знаменателе первой дроби вследствие опечатки вместо 4342948 стоит 4142948.

[126] В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: вместо $\mathrm{L}\frac{p'}{q}$ напечатано $\mathrm{L}\frac{p}{q}$. Напомним, что логарифм Бугер обозначал буквою L.

[127] В оригинале ошибочно вместо $\frac{g}{h}n+2\mathrm{L}n$ напечатано $n+2\mathrm{L}n$.

[128] Сущность решаемой Бугером задачи и способ ее решения могут быть пересказаны следующим образом.

Требуется подобрать расстояния $r_1=m$ и $r_2=n$, при которых освещенности

$$E_1=\frac{I\tau^{r_1}}{r_1^2} \text{ и } E_2=\frac{I\tau^{r_2}}{r_2^2}$$

от источника с силою света I в среде с прозрачностью τ находятся в заданном отношении

$$\frac{E_2}{E_1}=\frac{p'}{q}.$$

Строится график зависимости $(-\log\tau)r$ от $\log r$ — рис. 21, соответствующий фиг. 36 на стр. 229 трактата. На горизонтальной оси откладывается отрезок

$$IS=\frac{1}{2}\log\frac{E_2}{E_1}=\frac{1}{2}\log\frac{p'}{q}.$$

Через точки I и S проводятся параллельные прямые IK и SD под таким углом к горизонтали, тангенс которого равен 2. Из точек K и D пересечения этих прямых с кривой опускаются перпендикуляры KV и DC на горизонтальную ось. Точки V и C соответствуют одной из пар искомых значений r_1 и r_2. Действительно:

$$VC=IS-IV+SC=\frac{1}{2}\log\frac{E_2}{E_1}+\frac{1}{2}r_1\log\tau-\frac{1}{2}r_2\log\tau=\log r_1-\log r_2$$

129 В тексте, а также на фиг. 36 оригинала допущена исправленная при переводе опечатка, а именно вместо v напечатано u.

130 В оригинале допущена следующая исправленная при переводе опечатка: вместо PQ напечатано VQ.

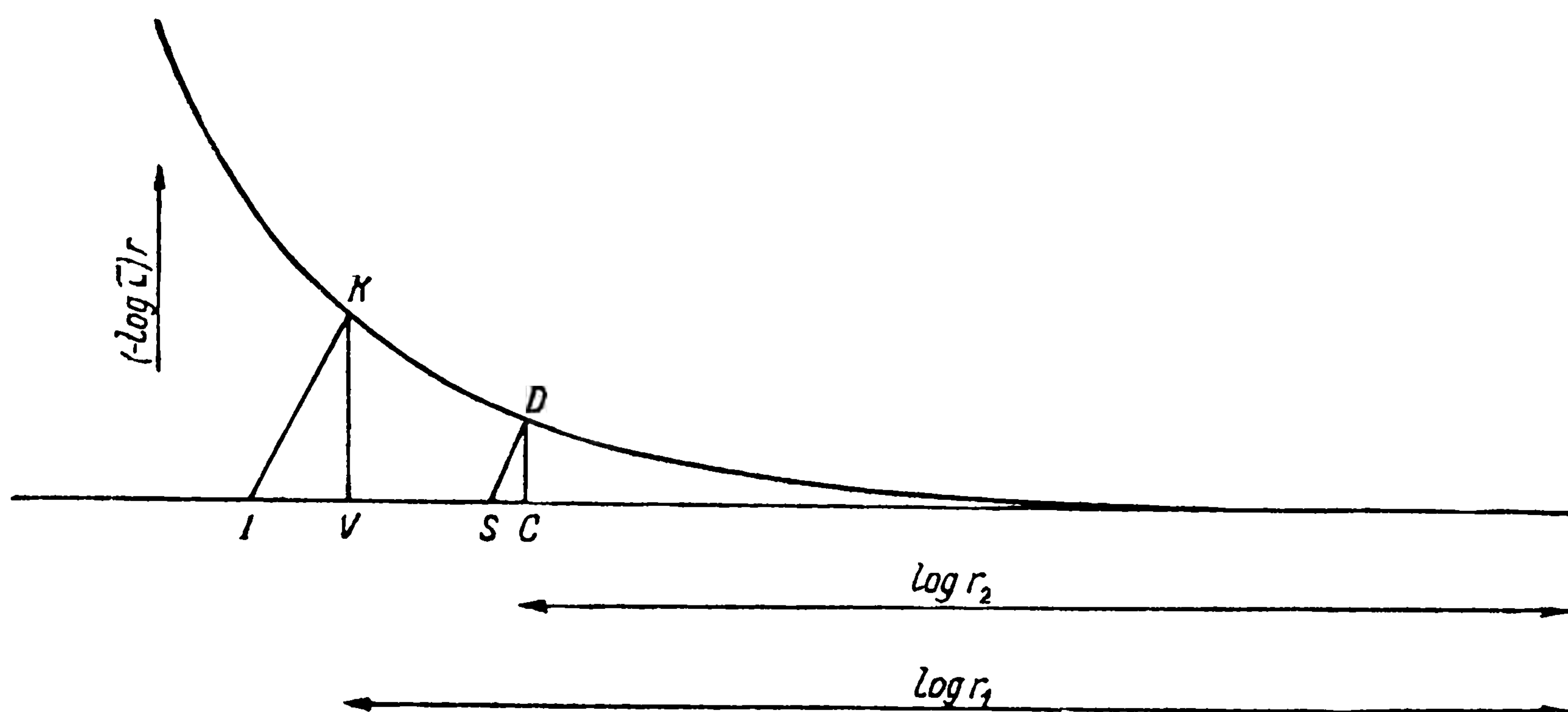


Рис. 21.

131 Сущность вывода Бугера может быть пересказана следующим образом.

Имеется прозрачное тело в форме плоскопараллельного слоя толщины $AP = u$ (фиг. 35 на стр. 215 трактата). Показатель преломления равен $\frac{e}{f}$.

Смещение изображения источника света равно

$$Aa = \frac{e-f}{e} u.$$

Если расстояние AP обозначить через x, то:

$$aP = x - \frac{e-f}{e} u = \frac{ex + (f-e) u}{e}.$$

Пропускание тела будет равно

$$ie^{-ku} = i\, 10^{-\frac{g}{h} u},$$

где

i — множитель, учитывающий потери на отражение,

$h = \frac{1}{k}$ (k — показатель поглощения),

$g = M$ (M — модуль для перехода от основания e к основанию 10).

Освещенность в точке P от источника с силою света I, помещенного в точке A, будет равна

$$E_0 = \frac{I}{AP^2} = \frac{I}{x^2}.$$

Если на пути стоит прозрачное тело толщины u, то освещенность будет равна:

$$E = \frac{Iie^{-ku}}{aP^2} = \frac{Ii\,10^{-\frac{g}{h}u}}{\left[\frac{ex + (f-e)u}{c}\right]^2}.$$

Бугер вводит обозначение

$$\frac{E}{E_0} = \frac{i\,10^{-\frac{g}{h}u}\,x^2}{\left[\frac{ex+(f-e)u}{e}\right]^2} = \frac{q}{p},$$

откуда

$$\frac{g}{h}u = \log i + \log p - \log q - 2\log\frac{ex + (f-e)u}{ex}.$$

Отметим, что в оригинале четырежды допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: вместо $\frac{q}{px^2}\left[\frac{ex+(f-e)u}{e}\right]^2$ напечатано $\frac{q}{px^2}\,\frac{[ex+(f-e)u]^2}{e}$.

132 Этот параграф (решение II) содержит помимо множества опечаток ошибки в формулах, приводящие к неверному построению. Он воспроизведен при переводе без всяких изменений по отношению к оригиналу.

133 В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: напечатано $\frac{bq}{a}$. Внесены также исправления в фиг. 37 и 39.

134 Речь идет об освещенностях, создаваемых перпендикулярно падающими лучами.

135 В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: вместо $BE - BM$ напечатано BM.

136 В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: вместо ссылки на фиг. 38 дана ссылка на фиг. 12.

137 В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно последний член напечатан как $L\frac{h}{a}$.

138 Сущность рассуждения Бугера может быть пересказана следующим образом. Источники, сила света которых по всем направлениям оди-

накова и равна для одного I_1, а для другого I_2, расположены в фокусах гиперболы. Если τ есть прозрачность среды, а l_1 и l_2 — расстояния от некоторой точки гиперболы до ее фокусов, то отношение освещенностей от обоих источников в этой точке будет равно:

$$\frac{I_1 \tau^{l_1}}{l_1^2} : \frac{I_2 \tau^{l_2}}{l_2^2} = \frac{I_1}{I_2} \frac{l_2^2}{l_1^2} \tau^{l_1 - l_2}.$$

Поскольку для различных точек гиперболы разность расстояний до фокусов $l_1 - l_2$ неизменна, отношение освещенностей будет изменяться как $\frac{l_2^2}{l_1^2}$.

139 В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: во втором равенстве вместо $+ \mathrm{L}p$ напечатано $- \mathrm{L}p$.

140 В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: вместо ссылки на фиг. 39 дана ссылка на фиг. 11.

141 Слова „la quantité de parties grossieres“ переведены словами „число частиц“.

142 В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: напечатано

$$\frac{NT \cdot VN \cdot NR \cdot Nn = VN \cdot Nn}{a^2}.$$

143 Для параболы m-го порядка $y = ax^m$ подкасательная равна $\frac{x}{m}$.

144 Сущность замечательного рассуждения Бугера сводится к следующему. Освещенность, создаваемая параллельным пучком, прошедшим путь x в среде, может быть принята равной:

$$y = e^{-\int_0^x k \cdot dx}.$$

Показатель поглощения k пропорционален плотности z среды в данной точке:

$$k = \frac{1}{a^2} z,$$

где $\frac{1}{a^2}$ — множитель пропорциональности. Следовательно:

$$y = e^{-\frac{1}{a^2} \int_0^x z \cdot dx}.$$

$\log y$ пропорционален $\int_0^x z \cdot dx$, т. е. пронизанной лучом массе вещества.

В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: вместо $a^2 \mathrm{L}\, y$ напечатано $a \mathrm{L}\, y$.

145 Мариотт (Mariotte, 1620—1684) — французский физик. Ему принадлежат строгая формулировка газового закона и его применение к барометрическому измерению высот.

146 Если некоторая величина y зависит от x по экспоненциальному закону

$$y = ae^{-kx},$$

то

$$\int_x^{\infty} y\,dx = \frac{1}{k}\, y,$$

а $\frac{1}{k}$ есть в этом случае длина подкасательной кривой $y = f(x)$.

147 La mer du Sud — старое наименование Тихого океана.

148 Данными произведенных Бугером измерений „густости“ воздуха на разных высотах пользовался М. В. Ломоносов (см. „Очерк жизни и трудов Пьера Бугера“).

149 P. Feuillée

150 Бугер принимает, что плотность воздуха $1 - z$ равна:

$$1 - z = e^{-\frac{x}{f}},$$

где x — высота над поверхностью земли. Отсюда

$$x = -f \ln(1 - z) = f\left(z + \frac{1}{2} z^2 + \frac{1}{3} z^3 + \ldots\right)$$

$$dx = \frac{f\,dz}{1 - z} = f\,dz\,(1 + z + z^2 + z^3 + \ldots).$$

Тогда масса воздуха, пронизываемого лучом, приходящим под углом φ к горизонтали, равна

$$\int_{x=0}^{x=\infty} \frac{(1 - z)(a + x)\,dx}{\sqrt{b^2 + 2ax + x^2}} = \int_{x=0}^{x=\infty} \frac{e^{-\frac{x}{f}}(a + x)\,dx}{\sqrt{b^2 + 2ax + x^2}},$$

где a — радиус земли, а $b = a \sin\varphi$.

Когда светило находится в зените $\left(\varphi = \frac{\pi}{2}\right)$, то $b = a$ и написанный интеграл становится равным f.

[151] В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: вместо $\left(\frac{2}{3}af+f^2\right)z^3$ или в обозначениях Бугера $\overline{\frac{2}{3}af+f^2}\times z^3$ напечатано $\frac{2}{3}\overline{af+f^2}\times z^3$.

[152] В оригинале допущены следующие выявленные и исправленные при переводе опечатки:

1) вместо $\frac{a^2f^2-b^2f^2}{b^3}\times z\cdot dz$ напечатано $\frac{a^2f^2+b^2f^2}{b^3}\times z\cdot dz$;

2) вместо $\frac{\frac{1}{2}a^2f^2-\frac{1}{2}b^2f^2}{b^3}\times z^2$ напечатано $\frac{\frac{1}{2}a^2f^2+\frac{1}{2}bf^2}{b^3}\times z^2$;

3) вместо $\frac{1}{\text{[illegible]}}a^2b^2f^2$ напечатано $\frac{1}{4}a^2b^2f^2$.

[153] В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: вместо $\frac{\frac{1}{2}a^2f^2-\frac{1}{2}b^2f^2}{b^3}\times z^2$ напечатано $\frac{\frac{1}{2}a^2f^2+\frac{1}{2}b^2f^2}{b^3}\times z^2$.

[154] Здесь Бугер использует понятие о приведенной высоте атмосферы и принимает ее равной либо 7.6 км (3911 туазов), либо 8.2 км (4197 туазов).

[155] Если принять воздушную массу по вертикали за единицу, то получатся значения, приведенные в следующей таблице:

Возвышение светила (в градусах)	Воздушная масса	
	по Бугеру	по Бемпораду
90	1	1.00
70	1.06	1.06
50	1.30	1.30
30	1.99	1.99
20	2.90	2.90
15	3.81	3.82
10	5.56	5.60
5	10.2	10.4
3	14.9	15.4
2	19.0	19.8
1	25.8	27.0
0	35.5	35.4

Эти значения хорошо совпадают с принятыми ныне и указанными в последнем столбце.

156 Под интенсивностью света Бугер в данном случае подразумевает величину πB, где B — яркость при принятом ныне ее определении.

Сила света, отражающего свет диска радиуса a в направлении его оси, равна, по теории Бугера (см. примечания 100 и 103),

$$I \quad p\frac{\mathcal{E}r^2}{4},$$

где

$\mathcal{E}$ — освещенность перпендикулярно падающими лучами в точке расположения диска,

r^2 — множитель, учитывающий площадь граней, отражающих свет в данном направлении, определяемый как радиус-вектор кривой в полярных координатах, называемой Бугером второй детерминатрисой неровностей (см. главу I четвертого раздела второй книги),

p — множитель, учитывающий неполноту отражения света отдельными гранями.

Отсюда яркость B равна

$$B = \frac{I}{\pi a^2} = \frac{p\mathcal{E}r^2}{4\pi a^2}.$$

Приняв $\mathcal{E} = 1$, получаем:

$$\pi B = \frac{pr^2}{4a^2}.$$

С учетом потерь света на пути l до глаза получаем

$$\pi B = \frac{pr^2}{4a^2}e^{-kl},$$

где e^{-kx} есть уравнение градулюцики, то есть кривой затухания света при прохождении пути x через среду. Этим выражением и пользуется Бугер.

157 Сущность вывода Бугера может быть пересказана следующим образом.

Пусть свет затухает по закону e^{-kx}. Это означает, что при прохождении объема dv световой поток падающего параллельного пучка уменьшается на величину $k\mathcal{E}dv$, где $\mathcal{E}$ — освещенность прямыми лучами. Ослабление света может быть обусловлено как поглощением, так и рассеянием. Пусть q определяет долю потери, вызванной рассеянием. Другими словами, принимаем, что объем dv рассеивает поток

$$qk\mathcal{E}\,dv.$$

Построим рис. 22 в дополнение к фиг. 45 на стр. 276 трактата. Пусть ω есть телесный угол, под которым из точки O глазу виден предмет Z. Примем

$$dv = \omega x^2\, dx.$$

Если свет рассеивается равномерно по всем направлениям (в дальнейшем Бугер рассматривает и неравномерное рассеяние), то сила света объема dv будет равна

$$\frac{1}{4\pi} qk\mathcal{E}\omega x^2\, dx.$$

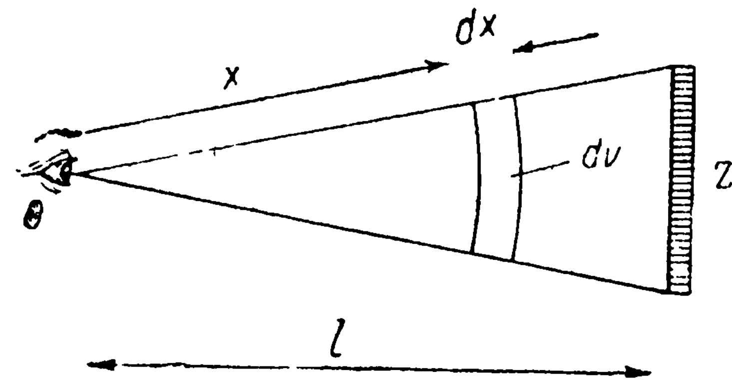


Рис. 22.

Другими словами, элементарная составляющая яркости от слоя толщины dx, если еще учесть множителем e^{-kx} потери на пути до глаза, будет равна

$$dB' = \frac{1}{4\pi} qk\mathcal{E} e^{-kx}\, dx.$$

Суммарная яркость дымки на протяжении до предмета Z будет равна

$$B' = \int\limits_{x=0}^{x=l} dB' = \frac{1}{4\pi} q\mathcal{E}(1-e^{-kl}).$$

Приняв $\mathcal{E} = 1$, получаем:

$$\pi B' = \frac{1}{4} q(1-e^{-kl}).$$

Поскольку

$$e^{-kl} = \frac{TR}{KI},$$

то

$$\pi B' = \frac{1}{4} q \frac{KI - TR}{KI}.$$

К этому выражению и приходит Бугер.

[158] Сущность этого замечательного вывода Бугера, определяющего, в частности, видимую яркость погруженного в море предмета и застилающей его дымки вследствие рассеяния света водой, может быть пересказана следующим образом.

При погружении предмета на глубину l яркость его будет убывать по закону e^{-2kl}, учитывая потери света на пути до объекта и от него.

Если освещенность слоя толщины dx на глубине x есть $\mathcal{E}e^{-kx}$, то составляющая яркости дымки от этого элементарного слоя, если еще учесть множителем e^{-kx} потери рассеянного света на пути до глаза, будет равна (см. примечание 157):

$$dB' = \frac{1}{4\pi} qk\mathcal{E}e^{-2kx}\,dx.$$

Суммарная яркость дымки в толще l до предмета Z будет равна

$$B' = \int\limits_{x=0}^{x=l} dB' = \frac{1}{8\pi} q\mathcal{E}(1 - e^{-2kl}).$$

Приняв $\mathcal{E} = 1$, получаем:

$$\pi B' = \frac{1}{8} q (1 - e^{-2kl}).$$

Поскольку

$$e^{-kl} = \frac{RT}{IK},$$

то

$$\pi B' = \frac{1}{8} q \frac{IK^2 - RT^2}{IK^2}.$$

К этому выражению и приходит Бугер.

При $l = \infty$ $(RT = 0)$ получаем:

$$\pi B' = \frac{1}{8} q.$$

[159] Приводимый Бугером расчет представляется весьма сомнительным как по исходным предпосылкам, так и числовым расчетам.

Гипсовая дощечка, рассматривавшаяся Бугером через освещенную половину хрусталя, была видна хуже не вследствие „вычитания“ света, а вследствие снижения контраста.

[160] В числе многих оптических инструментов, разработанных и осуществленных великим современником Бугера М. В. Ломоносовым, есть и bathoscopium — прибор для наблюдения подводных объектов. В письме М. В. Ломоносова от 8 июня 1759 г. И. И. Шувалову можно прочесть: „... стараюсь произвести в действие еще новый оптический инструмент,

которым бы много глубже видеть можно было дно в реках и в море нежели как видим просто. Коль сие в жизни человеческой полезно, всяк удобно рассудить может".

[161] Приводимые Бугером соотношения могут рассматриваться как общая теория расчета предельной глубины видимости погруженных в море объектов, в частности белого диска для оценки прозрачности воды. Сущность теории, являющейся совершенно правильной, если не говорить о числовых значениях, может быть вкратце охарактеризована следующим образом. При погружении объекта на глубину l его яркость убывает по закону e^{-2kl}, а яркость дымки на пути до объекта растет пропорционально $1 - e^{-2kl}$. Контраст убывает, и при определенном его значении $\left(\text{Бугер его принимает равным } \frac{1}{60}\right)$ объект (у Бугера — грунт) перестает быть видимым.

[162] Полученное Бугером соотношение можно записать следующим образом.

Пусть

x — бегущая координата от глаза по лучу зрения,

k — показатель ослабления света в точке с координатой x,

q — доля рассеяния в общем ослаблении для точки с координатой x,

s — интенсивность прямого света (освещенность перпендикулярно падающими лучами) в точке с координатой x,

B — яркость в направлении луча зрения, обусловленная рассеянием света.

Бугер для случая сферической индикатриссы рассеяния получает правильное соотношение:

$$\pi B = \int \frac{1}{4}\, qse^{-\int\limits_0^x k \cdot dx} kdx = \int \frac{1}{4}\, qsd\left(e^{-\int\limits_0^x k \cdot dx}\right).$$

[163] Бугер вычисляет для наблюдателя, находящегося на некоторой высоте над поверхностью земли, яркость неба в зените и яркость воздушной дымки при взгляде вниз. При этом Бугер учитывает, что разные слои атмосферы разно освещены и по-разному рассеивают свет, поскольку высокие слои освещены лучше нижних и плотность атмосферы убывает с высотой.

Бугер получил совершенно правильные и весьма нужные при современном развитии науки соотношения, однако архаичность их вывода и формулировок оставила их в небытии. Попытаемся получить эти соотношения таким путем и в таком виде, при котором они могут войти в фонд современной науки.

Рассчитаем первоначально яркость неба в зените для наблюдателя, расположенного на произвольной высоте над уровнем земли. Будем, как и Бугер, считать солнце расположенным высоко.

Введем следующие обозначения:

x — высота некоторого слоя воздуха над поверхностью земли,
$\rho(x)$ — показатель рассеяния в направлении луча зрения,
$E(x)$ — освещенность от солнца на высоте x над землей,
h — высота наблюдателя над поверхностью земли,
$t(x, h)$ — пропускание света по вертикали от высоты x до высоты h.

Тогда яркость неба в зените, которую обозначим через B, будет равна (см. примечание 162):

$$B = \frac{1}{4\pi} \int\limits_{x=h}^{x=\infty} \rho(x) E(x) t(x, h) \, dx.$$

Поскольку в этом случае

$$E(x) t(x, h) = E(h),$$

то

$$B = \frac{1}{4\pi} \int\limits_{x=h}^{x=\infty} \rho(x) E(h) \, dx$$

или

$$\pi B = \frac{1}{4} E(h) \int\limits_{x=h}^{x=\infty} \rho(x) \, dx.$$

Обозначим через $m(h)$ воздушную массу выше высоты h, причем, следуя Бугеру, будем выражать воздушную массу эквивалентной толщей приземного воздуха. Считая показатель рассеяния пропорциональным плотности воздуха, получаем:

$$\int\limits_{x=h}^{x=\infty} \rho(x) \, dx = \rho(0) m(h),$$

где $\rho(0)$ есть значение показателя рассеяния для приземного воздуха.

Отсюда следует, что

$$\pi B = \frac{1}{4} \rho(0) E(h) m(h).$$

Бугер этой формулы не приводит, но дает графическое построение для определения величины πB.

Чтобы подойти к этому построению, проделаем следующие преобразования. Введем величину k — показатель ослабления света в приземном воздухе, как вследствие рассеяния, так и поглощения (при прохождении пути l прямой свет убывает по закону e^{-kl}).

Введем также вспомогательную величину:

$$q = \frac{\rho(0)}{k}.$$

Тогда

$$E(h) = Ee^{-km(h)},$$

где E — освещенность за пределами земной атмосферы.

Выражение для яркости может быть записано в виде

$$\pi B = \frac{1}{4} qEk\, m(h) e^{-km(h)}.$$

Эта формула и соответствует графическому приему Бугера, иллюстрируемому фиг. 48 на стр. 289 трактата и соответствующим ему рис. 23. Строим график зависимости по экспоненциальному закону освещенности $E(x)$ от массы воздуха $m(x)$. Высоте наблюдателя $x = h$ соответствует точка C кривой. Строим касательную ZC к кривой в точке C и прямую FC, параллельную оси абсцисс. Поскольку

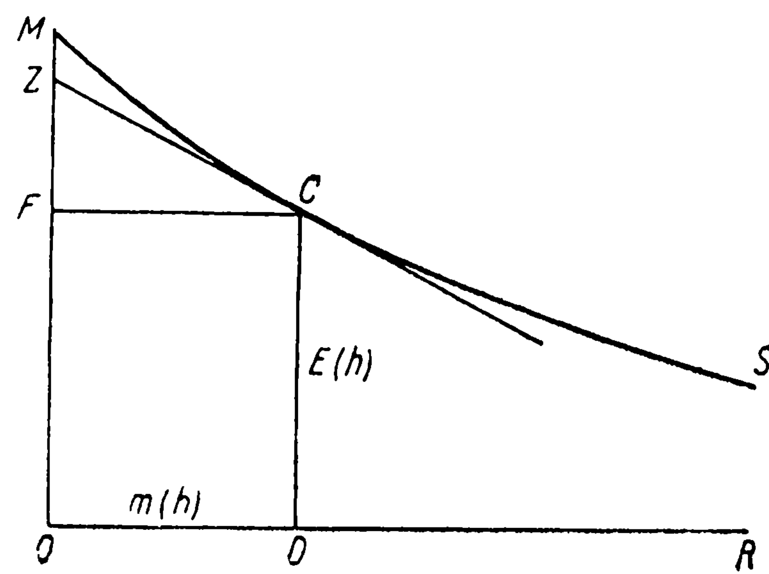


Рис. 23.

$$\operatorname{tg} \angle ZCF = -\left| \frac{dE(x)}{dm(x)} \right|_{x=h} = kE(h),$$

то

$$FZ = m(h)\, kE(h) = Ek\, m(h)\, e^{-km(h)}$$

и

$$\pi B = \frac{1}{4} FZ \times q.$$

К этому соотношению и приходит Бугер.

Перейдем теперь к расчету яркости воздушной дымки при отвесном наблюдении с высоты вниз.

Пользуясь теми же обозначениями, получим, что яркость B' воздушной дымки, застилающей землю для наблюдателя на высоте h, равна:

$$B' = \frac{1}{4\pi} \int\limits_{x=0}^{x=h} \rho(x) E(x) t(h, x) dx.$$

Используя соотношения

$$t(h, x) = \frac{E(x)}{E(h)}$$

$$\rho(x) dx = -\rho(0) dm(x) = \rho(0) \frac{1}{k} \frac{dE(x)}{E(x)} = q \frac{dE(x)}{E(x)},$$

получаем

$$\pi B' = \frac{1}{4} \int\limits_{x=0}^{x=h} q \frac{E(x) dE(x)}{E(h)} = \frac{q}{4E(h)} \int\limits_{x=0}^{x=h} E(x) \cdot dE(x) =$$

$$= \frac{q}{8} \frac{E^2(h) - E^2(0)}{E(h)} = \frac{q}{8} \frac{DC^2 - RS^2}{DC}.$$

Это соотношение Бугер и приводит.

В случае равномерного рассеяния (сферической индикатриссы рассеяния) величина q может рассматриваться как доля рассеяния в сумме поглощения и рассеяния. В случае неравномерного рассеяния, а оно всегда неравномерно, величина q имеет указанное выше значение

$$q = \frac{\rho}{k},$$

где ρ — показатель рассеяния в данном направлении, а k — показатель ослабления (экстинкции), равный сумме показателей поглощения и рассеяния (среднего по всем направлениям).

Бугер показывает, что рассеянный свет распределяется по различным направлениям неравномерно. Он замечает также, что индикатриса рассеяния имеет вытянутую форму, что по направлениям вперед рассеивается больше света, чем по направлениям назад.

Бугер характеризует направление рассеяния „углом падения“ α, указанным на рис. 24 и равным половине угла рассеяния, то есть угла между падающим и рассеянным лучами.

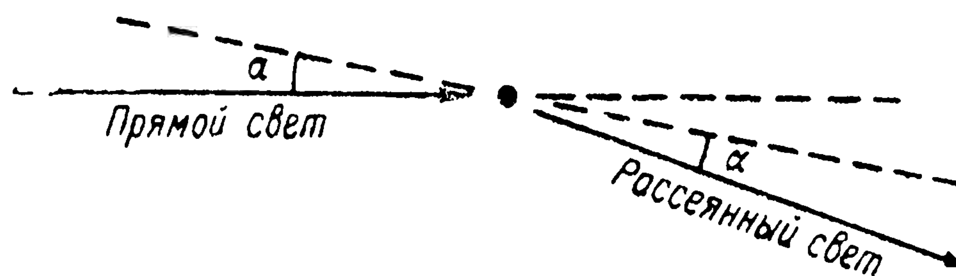


Рис. 24.

164 В оригинале допущена исправленная при переводе опечатка, а именно: вместо $\frac{2575}{10000}q$ напечатано $\frac{25754}{10000}$.

165 Mémoires de Trévoux.

166 Расчет Бугера представляется неверным. Вместо разности $\frac{1}{701}-\frac{2565}{10000}q$ должна была бы стоять сумма $\frac{1}{701}+\frac{2565}{10000}q$, что привело бы к совершенно иному, значительно меньшему значению q.

Примечания к статье Ф. Мари

167 François Marie. Nouvelle découverte sur la Lumière. Pour la mesurer & en compter les degrés. A Paris, chez Louis Sevestre, MDCC.

Работа Ф. Мари докладывалась в августе 1699 г. на собрании членов Академии Наук в Париже и была издана в 1700 г. с письменного одобрения непременного ее секретаря Фонтенеля.

Переводчики пользовались предоставленной академиком С. И. Вавиловым фотокопией с экземпляра книги из собрания Национальной библиотеки в Париже.

Перевод сильно сокращен. Подлинник содержит XXII + 69 страниц формата in 8° и 1 рисунок.

Франсуа Мари многословен и склонен к повторениям и загромождающим изложение общим сентенциям; при переводе они исключены.

Научное значение работы Ф. Мари очерчено в предшествующей статье о Бугере. Любопытно, что в брошюре Ф. Мари указан адрес оптика и часовщика, у которого можно приобрести для проведения опытов приборы, описанные в брошюре. Два из предложенных Франсуа Мари четырех их наименований, а именно „фотометр“ и „люциметр“ („люксметр“) вошли в обиход



СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ОПТИЧЕСКИЙ ТРАКТАТ О ГРАДАЦИИ СВЕТА

ПРЕДУВЕДОМЛЕНИЕ ИЗДАТЕЛЯ 9

Книга первая

РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТА И НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ЭТИХ СПОСОБОВ

Раздел первый. **Способы находить соотношение между силами двух различных светов** 16

Глава I. Использование свечей или ламп для измерения света . . . 16

Глава II. Подробное описание предосторожностей, которые надлежит соблюдать при сравнении двух светов. 19

Глава III. Способ получить от одного светильника или от одной свечи пучки света, которые надлежит сравнивать в различных опытах 25

Глава IV. Второй способ получить от одного светильника или от одной свечи пучки света, которые надлежит сравнивать 30

Глава V. Решение большинства предыдущих задач путем введения некоторой части дневного света в камеру-обскуру 34

Глава VI. Устройство прибора, предназначенного для измерения силы света и обладающего некоторыми свойствами камеры-обскуры 37

Глава VII. Второй способ употребления стеклянных чечевиц или объективов зрительных труб для измерения света 39

Глава VIII. Пользуясь приборами, изображенными на фиг. 10 и 11, измеряют непосредственно интенсивность света, а не полное его количество 42

Глава IX. Сравнение изложенных способов измерения света со способами, предложенными различными авторами 45

Раздел второй. **Приложения изложенных способов измерения света к решению некоторых задач оптики** 51

Глава I. Наблюдения, сделанные для определения того, какова должна быть сила света, при которой другой, более слабый свет перестает быть видным 51

Глава II. Опыты над отражением от зеркал 54

Глава III. Наблюдения над прозрачностью простого и зеркального стекла 56

Глава IV. Опыты над прозрачностью морской воды 57

Глава V. Наблюдения, произведенные над светом, отраженным от шероховатых поверхностей. 60

Глава VI. Наблюдения над количеством света, отражаемым нам каждым участком неба или атмосферы 63

Глава VII. Наблюдения, произведенные с целью обнаружить, насколько одна значительная часть неба освещает более другой части . 66

Глава VIII. Найти, насколько свет солнца сильнее света, посылаемого нам значительной частью видимого неба, или насколько он сильнее, нежели тени предметов, освещенных прямыми лучами солнца 67

Глава IX. Найти, насколько свет небесных светил увеличивается или уменьшается при изменении их возвышения над горизонтом . 69

Глава X. Использование предыдущих наблюдений для определения прозрачности некоторой толщи воздуха 71

Глава XI. Наблюдения, сделанные для определения того, насколько свет солнца сильнее света полной луны 73

Глава XII. Наблюдения, сделанные с целью определить, насколько тельнее светят части солнца, близкие к его середине, сравнисильно с теми, которые расположены у краев этого светила . . 76

Книга вторая

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВА СВЕТА, КОТОРОЕ ОТРАЖАЕТСЯ ПОВЕРХНОСТЯМИ КАК ГЛАДКИМИ, ТАК И ШЕРОХОВАТЫМИ

Раздел первый. **Замечания об отражении, производимом бесконечно гладкими поверхностями, не гасящими ни одного луча** 84

Глава I. О мнимом отражательном фокусе плоских поверхностей и об интенсивности отражаемого ими света 84

Глава II. Об отражательном фокусе кривых линий 85

Глава III. О двойных мнимых отражательных фокусах кривых поверхностей 86

Глава IV. О силе света, отраженного бесконечно гладкой выпуклой сферической поверхностью 90

Глава V. Свет, отраженный от всех частей сферы, в точности одинаков по силе, если воспринимать его на очень большом расстоянии и если светящая точка также весьма удалена от сферы . 91
Глава VI. О количестве света, отражаемого поверхностями, шероховатости и неровности которых заменяются маленькими, совершенно гладкими полусферами 94
Глава VII. О свете, отражаемом сферою, поверхность которой покрыта бесконечным числом маленьких, совершенно гладких полусфер 98
Глава VIII. О свете, отражаемом нам планетами и, в частности, Луною, согласно двум сделанным выше гипотезам, а именно: 1) поверхности их совершенно гладки; 2) они покрыты бесконечным множеством маленьких, совершенно гладких полусфер . . 99
Раздел второй. **Изыскания о количестве света, отражаемого физическими телами с полированными поверхностями** . . 103
Глава I. О том, что при отражении часть света всегда оказывается как бы потушенною 103
Глава II. О том, что число отраженных лучей не находится в постоянном отношении к числу падающих лучей при различных наклонах 104
Глава III. О различной силе отражения, производимого поверхностью воды при различных углах падения света 108
Глава IV. Построение таблицы, указывающей количества света, отражаемого водою при всевозможных наклонах лучей 110
Глава V. Построение таблицы количества света, отражаемого стеклом, из которого изготовляют зеркала 112
Глава VI. О сравнении светов, отражаемых поверхностями воды и ртути, когда эти две жидкости находятся в одном сосуде . . 113
Глава VII. О количестве света, отражаемого при наименьших наклонах внутреннею поверхностью прозрачного тела, когда свет направляется к выходу из него 118
Глава VIII. О количестве света, отражаемого внутреннею поверхностью при наибольших углах наклона. 123
Глава IX. О свете, поглощаемом или погашаемом поверхностями прозрачных тел независимо от отражений 127
Раздел третий. **Об отражении света на матовых или шероховатых поверхностях** 131
Глава I. О том, что интенсивность света, отражаемого матовыми поверхностями, не может быть вычислена, если исходить из гладких маленьких полусфер 131
Глава II. Способ наблюдать различные интенсивности света, отражаемого поверхностями, рассматриваемыми в том же направлении, в котором они освещаются 132

Глава III. О распределении маленьких неровностей, существование которых вытекает из предыдущих опытов 134
Глава IV. О выражении маленьких неровностей через ординаты кривой линии 137
Глава V. Об интенсивности света или цвета шероховатых поверхностей, освещаемых и рассматриваемых в двух совершенно различных направлениях, — важная теорема 141
Глава VI. Королларии к предыдущей теореме 143
Глава VII. Зная положение светящего тела по отношению к матовой поверхности, найти направление, на котором надлежит поместить глаз, дабы интенсивность отраженного света была возможно большей 147
Глава VIII. Об интенсивности света или цвета матовых поверхностей в том случае, когда плоскость, проходящая через их центр, светящее тело и глаз, не перпендикулярна этим поверхностям 149
Глава IX. О нумератрисе неровностей у планет 152
Глава X. Вывести из однажды определенной нумератрисы неровностей величины яркости, которыми должны обладать различные точки планеты при всех возможных положениях ее относительно Солнца 154
Глава XI. О том, что на поверхности планеты всегда имеется бесчисленное множество одинаково ярких точек 156
Глава XII. Обстоятельства, при которых все одинаково светящие точки планеты расположены на дугах эллипса 158
Раздел четвертый. **Об абсолютной величине граней равного наклона на шероховатых поверхностях и о количестве полного света, отражаемого ими** 159
Глава I. Определить для шероховатых поверхностей отношение между их общей площадью и площадью маленьких граней, имеющих любой заданный наклон 160
Глава II. Приложения предыдущего решения к матовым серебряным пластинкам и к гипсовым поверхностям, а также точное определение количества света, поглощаемого этими последними поверхностями 164
Глава III. Приложение общего решения из главы I к нумератрисе неровностей, наиболее подходящей для большинства планет . . 169
Глава IV. О полном свете, отражаемом нам планетами в их различных фазах 170
Глава V. Найти, какую часть света, получаемого от Солнца, возвращают нам планеты, находясь в противостоянии, если считать, что ни один луч не погашается 176

Глава VI. Первое пояснение. Отражают ли маленькие неровности получаемые ими параллельные лучи параллельными или же они отражают их подобно выпуклым поверхностям? 179
Глава VII. Второе пояснение. Спрашивается, что делается с лучами, отражаемыми от одной маленькой неровности на другую? . . 182

Книга третья

ИЗЫСКАНИЯ О ПРОЗРАЧНОСТИ И НЕПРОЗРАЧНОСТИ ТЕЛ

Раздел первый. **О законе, которому подчинены изменения света, проходящего сквозь различные толщи прозрачного тела** 188
Глава I. О том, что свет, проходя однородные и одинаково толстые слои прозрачного тела, не уменьшается согласно членам арифметической прогрессии 188
Глава II. О том, что при возрастании толщин на равные величины свет уменьшается подобно членам геометрической прогрессии 189
Глава III. Об использовании логарифмической кривой для представления ослабления света 190
Глава IV. О том, какому закону должна следовать удельная прозрачность сред 192
Глава V. О том, что все только что установленное может быть применено к телам, называемым непрозрачными 195
Глава VI. В то время как мы вынуждены учитывать при прохождении света через прозрачное тело в перпендикулярном направлении те изменения, которые он претерпевает от двух поверхностей, можно совершенно пренебречь влиянием вторичных отражений, третичных и т. д. 197
Раздел второй. **Способ вычисления сил светов, проходящих различные толщи прозрачных тел, когда лучи вполне параллельны** 200
Первая задача. Найдя с помощью способов, изложенных в первой книге, часть света, проходящую сквозь данную толщу тела, обладающего повсюду одинаковою прозрачностью, определить часть света, проходящего сквозь все другие толщи того же тела . 202
Вторая задача. Зная уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении известной толщи прозрачного тела, найти толщину, на которую свет должен проникнуть в это же тело, дабы претерпеть любое желаемое уменьшение 205
Третья задача. Зная с помощью способов, изложенных в первой книге, уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении некото-

рой толщи различных прозрачных тел, найти удельную прозрачность этих тел 207
Четвертая задача. Найти подкасательную логарифмической кривой, свойственной прозрачному телу 208
Пятая задача. Зная из опыта уменьшение, претерпеваемое светом при прохождении известной толщи прозрачного тела, определить толщину, которую необходимо придать телу, чтобы сделать его непрозрачным 210
Раздел третий. **Способ вычислить силы света в том случае, когда светящее тело не удалено на бесконечное расстояние** 213
Первая задача. Сравнить в общем виде различные силы, которыми обладает свет на различных расстояниях от светящего тела, когда этот свет проходит сквозь тело, повсюду одинаково прозрачное 218
Вторая задача. Установить заданное отношение между светом, воспринимаемым непосредственно от светящего тела, и светом, воспринимаемым с того же расстояния после прохождения сквозь прозрачное тело 233
Третья задача. Два светящих тела *А* и *Б* расположены на некотором расстоянии друг от друга в среде, повсюду одинаково прозрачной; требуется найти отношение, которое существует между их светами, когда последние воспринимаются в заданных точках „*Е*“, „*е*“ и т. д., или, напротив, найти в каких точках „*Е*“, „*е*“, и т. д. надлежит воспринимать эти светы, если угодно, чтобы последние находились в некотором заданном отношении 237
Раздел четвертый. **Об уменьшении, претерпеваемом светом, проходящим сквозь тела, не везде одинаково плотные** 249
Глава I. О том, что кривая различных плотностей среды может быть легко построена, коль скоро известна градулюцика этой среды 253
Глава II. О прозрачности атмосферы 255
Раздел пятый. Исследования количеств света, отражаемых внутренними частями прозрачных тел, различных интенсивностей цветов воздуха, и т. д. 275
Глава I. Об отражении, производимом внутренними частями прозрачных тел, когда эти тела равномерно освещены по всей своей толще и одинаково плотны во всех своих частях 276
Глава II. Об интенсивности света предмета и света, отражаемого внутренними частями среды, в случае, когда освещающий их свет проходит сквозь среду 278
Глава III. Наблюдения над светом, отражаемым внутренними частями хрусталя 280

Глава IV. Предположения о прозрачности морской воды 282
Глава V. О свете, отражаемом внутренними частями среды, если последняя не обладает повсюду одинаковою плотностью и если она освещается светом различных степеней 285
Глава VI. Различные приложения формул предыдущей главы к цвету воздуха 288
Глава VII. О цветах воздуха вблизи зенита, когда солнце находится на горизонте, и цветах воздуха вблизи горизонта, когда солнце находится в зените. Два различных способа видения весьма удаленных земных предметов 291
Глава VIII. Замечания о различных способах определять часть света, отраженную частицами воздуха 296

ПРИЛОЖЕНИЯ

Предисловие к книге „Опыт о градации света" (1729 г.) *П. Бугер* . . 301
Франсуа Мари. Новое открытие, касающееся света. О его измерении и исчислении его ступеней 307
Послесловие редактора. *А. А. Гершун* 319
Очерк жизни и трудов Пьера Бугера. *А. А. Гершун* 327
I. Биография Пьера Бугера 327
II. Фотометрия до Бугера 358
III. Фотометрия Бугера 374
Список печатных трудов Бугера 401
Комментарий. *А. А. Гершун* 403

*Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Академии Наук СССР*

*

Редактор издательства *Ю. А. Эшман*
Технический редактор *А. В. Смирнова*
Корректор *Н. П. Ракова*

*

РИСО АН СССР № 3856. Подписано
к печати 3/IV 1950 г. Печ. л. 30 + 5 вкл.
Уч.-изд. л. 24.2. М.—02317. Тираж 5000.
Зак. № 1560. **Цена в переплете 21 руб.**

1-я тип. Изд. АН СССР, Ленинград,
В. О., 9 л., д. 12

ИСПРАВЛЕНИЯ И ОПЕЧАТКИ

Страница	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
37	Фиг. 10	P	R
62	10—11 сверху	дополнительно к посторонним светам;	совокупно с посторонними светами;
142	Фиг. 22 на линии PM'	E	E'''
219	1 снизу	PP	PQ
240	2 „	то	что
240	10 „	что	то
276	10 сверху	светящего	прозрачного
406	18 „	25%	2.5%
408	„	$=t\,\frac{NL^2}{BL^2\cdot NQ^2}\cdot$	$=t\,\frac{NL^2}{BL^2\cdot NQ^2}\,I.$
409	1 снизу	$\frac{\cos\alpha}{PE^2}$	$\frac{I\cos\alpha}{PE^2}$
413	10 сверху	уравнения	уравнивания
448	4 снизу	$=\frac{EC}{EK}\cdot$	$=\frac{ES}{EK}\cdot$
453	8 сверху	$\frac{E'}{\mathcal{E}}-\frac{u^2}{4D^2}\cdot$	$\frac{E'}{\mathcal{E}}=\frac{u^2}{4D^2}$
468	2 снизу	$\int\limits_{x=h}^{x=\infty})\,dx=\rho(0)\,m(h),$	$\int\limits_{x=h}^{x=\infty}\rho(x)\,dx=\rho(0)\,m(h),$

Пьер Бугер. Оптический трактат о градации света.

ESSAI D'OPTIQUE, SUR LA GRADATION DE LA LUMIERE.

Par M. BOUGUER, *Professeur Royal en Hydrographie.*



A PARIS,

Chez CLAUDE JOMBERT, ruë S. Jacques,
au coin de la ruë des Mathurins,
à l'Image Notre-Dame.

M. DCCXXIX.

Avec Approbation & Privilege du Roi.

Титульный лист первой книги по фотометрии Пьера Бугера (1729 г.).

Nous n'avons icy rien de neuf. M. Clairaut est en Angleterre il a lu les pieces des prix avant son depart, et il nous a promis d'être icy de retour avant pacques pour convenir avec les autres Commissaires. On ne peut qu'attendre des choses considerables de votre ami M. Kratzenstein; l'estime que vous paroissez avoir pour luy est un titre qui suffit pour que tout le monde luy soit favorable. Vous m'avez fait l'honneur de me parler dans quelqu'une de vos lettres precedentes de l'essai qu'il avoit fait sur l'architecture navale ce qui avoit reussi vous a-t-il fait part de toutes les particularités de la tentative, avez vous un plan du Navire, un devis de la mâture &c? Si vous avez toutes ces choses et que vous voulussiez m'en faire part, je vous en serois infiniment obligé et je pourrois parler icy à quelqu'un à qui le pacquet pourroit être adressé, pour m'exempter des frais du port. Vous voudrez bien excuser les griffonages de cette lettre, que je n'ai pas le courage de relire. Vous voyez que le papier me manque. Je profite du peu qui me reste pour vous reiterer les assurances de mon attachement sincere et de la consideration parfaite avec laquelle j'ay l'honneur d'être

Monsieur,

votre trés humble et trés obeissant serv.

à Paris rüe des Postes le 23 nov. 1752.

Bouguer

Факсимиле Пьера Бугера.

(Из письма Леонарду Эйлеру от 23 ноября 1752 г.; хранится в Архиве Академии Наук СССР).



Пьер Бугер (1753 г.).
С портрета работы Ж. Б. Перроно.

БУГЕРОВО
Новое Сочиненіе
О
НАВИГАЦІИ
СОДЕРЖАЩЕЕ
ТЕОРІЮ И ПРАКТИКУ
МОРСКАГО ПУТИ.

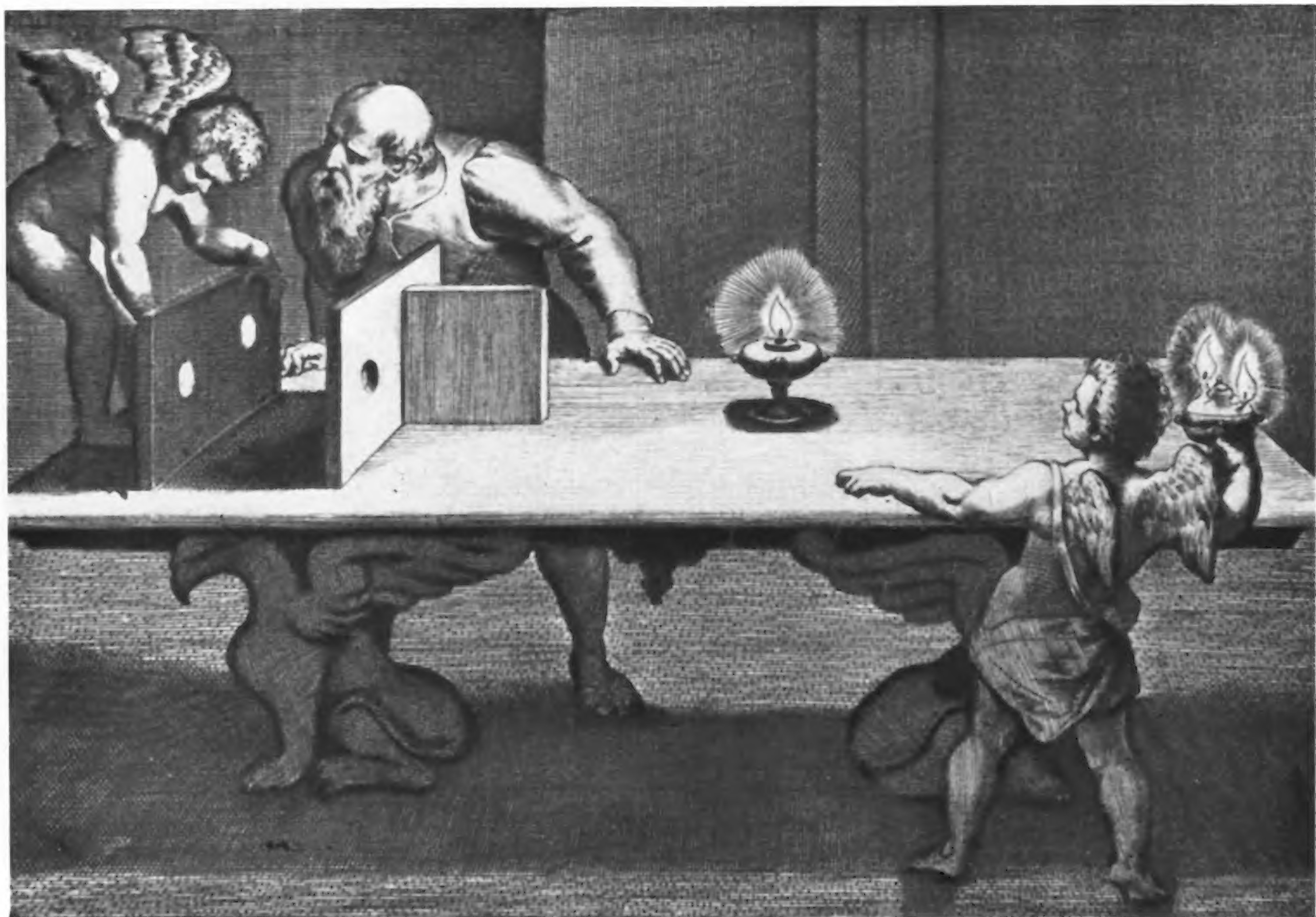
съ французскаго перевелъ Математическихъ и Навигацкихъ Наукъ Учитель Николай Кургановъ.



ВЪ САНКТПЕТЕРБУРГѢ.

при Морскомъ Шляхетномъ Кадетскомъ Корпусѣ 1764 года.

Титульный лист первого русского издания сочинения Пьера Бугера.



П. Рубенс. Заставка в книге об оптике Францискуса Агвилониуса (1613 г.).

П. БУГЕР

ОПТИЧЕСКИЙ ТРАКТАТ О ГРАДАЦИИ СВЕТА



24 руб